

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Регулятор Смита для объекта с большим транспортным запаздыванием

УДК 681.515.8:681.516.73

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Гудков Егор Павлович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Курганов В.В.	К.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Аверкиев Алексей Анатольевич			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Громаков Евгений Иванович	К.Т.Н.		

Томск – 2021 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения.
P2	Иметь осведомлённость о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств.
P3	Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для автоматизации технологических процессов и производств
P6	Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств.
P7	Уметь выбирать и использовать подходящее программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств.
Универсальные компетенции	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации и управления техническими объектами, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
 Уровень образования – бакалавриат
 Период выполнения – осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.04.2021	Основная часть	60
04.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
13.05.2021	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:
Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Курганов Василий Васильевич	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	к.т.н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки – 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Громаков Е.И.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
8Т6Б	Гудков Егор Павлович

Тема работы:

Регулятор Смита для объекта с большим транспортным запаздыванием	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№50-16/с от 19.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<p>Объектом исследования являются параметры регуляторов объекта с транспортным запаздыванием</p> <ul style="list-style-type: none"> • Лабораторный стенд с объектом управления; • Программное обеспечение; • ПИД-регулятор; • Предиктор Смита
---------------------------------	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Выбор регуляторов; • Обоснование выбора контроллера; • Создание управляющей программы в среде Codesys; • Идентификация объекта управления; • Исследование предиктора Смита и ПИД регулятора; • Моделирование в среде Matlab Simulink и проверка результатов моделирования; • Исследование параметров реального объекта с регуляторами; • Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; • Раздел «Социальная ответственность».
<p>Перечень графического материала</p>	<p>Презентация в формате *.ppt</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Маланина Вероника Анатольевна, доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Аверкиев Алексей Анатольевич, ассистент ООД ШБИП</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОАР ИШИТР</p>	<p>Курганов Василий Васильевич</p>	<p>Доцент, к.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8Т6Б</p>	<p>Гудков Егор Павлович</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8Т7Б	Гудков Егор Павлович

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04. Автоматизация технологических процессов и производств

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Накладные расходы 10%; Районный коэффициент 30%
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Действующие ставки единого социального налога и НДС (см. МУ, ставка дисконтирования $i=0.1$)
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования
<i>2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.
<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<i>«Портрет» потребителя результатов НТИ Сегментирование рынка Оценка конкурентоспособности технических решений Диаграмма FAST Матрица SWOT График проведения и бюджет НТИ Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	Доцент, К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Гудков Егор Павлович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т7Б	Гудкову Егору Павловичу

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: исследование параметров регулятора объекта с большим транспортным запаздыванием. Область применения: системы управления технологическими объектами.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования; – ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения); – ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда; – ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> – вредные вещества; – шумы; – электромагнитные поля; – высокое напряжение; – искусственное освещение; – использование средств индивидуальной и коллективной защиты; – соблюдение электро и пожаровзрывобезопасности.

3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> – попадание вредных элементов в гидросферу; – выброс загрязняющих веществ в атмосферу; – загрязнение почвы.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – взрыв; – поражение электрическим током; – возгорание.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Аверкиев Алексей Анатольевич	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т7Б	Гудков Егор Павлович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 90 с., 30 рис., 22 табл., 43 источника.

Ключевые слова: стенд, ПИД регулятор, предиктор Смита, запаздывание, управление.

Объектом исследования являются параметры системы с регулятором объекта с транспортным запаздыванием.

Цель работы – анализ существующих алгоритмов управления стендом физического подобия технологического процесса с запаздыванием; исследование и сравнительный анализ предиктора Смита и ПИД – регулятора.

Проведён анализ существующих алгоритмов управления объектами. Для управления объектом было предложено использование классического ПИД-регулятора и специального регулятора для объектов с запаздыванием - предиктора Смита.

Для настройки коэффициентов регулятора произведена идентификация объекта управления по кривой разгона. На реальном объекте было проведено моделирование замкнутых систем с ПИД-регулятором и предиктором Смита. В результате моделирования предиктор Смита показал лучшие качественные показатели.

Области применения – технологические процессы с транспортным запаздыванием.

Оглавление

Введение.....	12
1 Литературный обзор	14
1.1 Технологические процессы с транспортным запаздыванием	14
1.2 Идентификация объекта управления.....	16
1.2.1 Пропорционально-интегро-дифференцирующие регуляторы.....	18
1.2.2 Методики настройки ПИД-регулятора.....	22
1.2.3 Метод Циглера-Никольса.....	23
1.3 Влияние запаздывания на устойчивость системы управления	25
1.4 Регулятор Смита для систем с запаздыванием	32
2 Объект и методы исследования.....	36
2.1 Описание стенда физического подобия технологического процесса и средств исследования.....	36
3 Экспериментальная часть работы	41
3.1 Идентификация систем управления	41
3.2 Исследование и моделирование систем с регулятором Смита и ПИД-регулятором в среде Matlab Simulink	43
3.3 Исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием	46
3.4 Результаты исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием.....	49
Выводы по разделам 1, 2, 3	56
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	57
4.1 Предпроектный анализ	58
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	58
4.2 Анализ конкурентных технических решений.....	58
4.3 SWOT-анализ	59
4.4 Планирование научно-исследовательской работы	62
4.4.1 Структура работ	62
4.4.2 Разработка графика проведения научно-технического исследования	63
4.5 Бюджет научно-технического исследования	66
4.5.1 Расчёт материальных затрат	67
4.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.....	67
4.5.3 Расчет амортизационных отчислений	68
4.5.4 Расчёт заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды	69
4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды.....	70
4.5.6 Накладные расходы	71
4.5.7 Формирование бюджета научно-технического исследования.....	71
4.5.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	72
4.5.9 Интегральный показатель ресурсоэффективности.	73

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент»	74
5 Социальная ответственность	75
5.1 Аннотация выпускной квалификационной работы по разделу социальная ответственность	75
5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	75
5.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	76
5.4 Электромагнитное излучение.....	79
5.5 Электробезопасность	80
5.6 Превышение уровня шума.....	81
5.7 Искусственное освещение	82
5.8 Экологическая безопасность	82
5.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	83
5.10 Техногенная безопасность	83
5.11 Безопасность при природных чрезвычайных ситуациях.....	84
5.12 Анализ объекта исследования	84
5.13 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	85
5.14 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	85
Выводы по разделу «Социальная ответственность»	85
Заключение	86
Список литературы	87

Введение

В настоящее время достаточно тяжело представить любое промышленное производство без средств автоматизации технологических процессов, так как это значительно упрощает управление большим количеством робототехнических процессов и мехатронных конвейерных линий роботизированной системы, а также повышает эффективность управления технологическим процессом, что в конечном итоге положительно сказывается на производстве и экономических показателях производства. Из этого можно сделать вывод, что создание инструментов автоматизированной системы - очень актуальная, важная и сложная задача.

Актуальность исследуемой темы связана с широким распространением технологических комплексов с транспортным запаздыванием. Для систем автоматизации характерны автоматические процессы управления: измерение, обработка, синхронизация движущегося объекта с передачей обработанной информации на панель управления. Размеры и сложность современных технологических комплексов, их систем и подсистем автоматизации в сочетании с программными комплексами постоянно растут.

Правильное функционирование автоматизированных систем зависит от грамотной постановки задачи, указания функций системы, которые следует автоматизировать, определения человеко-компьютерных интерфейсов, описания взаимодействия системы с окружающей средой и т. д.

Запаздывание - это задержка, связанная с перемещением продукта по длинным товарным линиям или конвейерам, например, движение вещества в производственном процессе с определенной скоростью без изменения его свойств, а также может быть задержка в системах управления производством, в которых устройства не работают непрерывно или периодически. Расчет таких систем может иметь множество особенностей и особенностей. Появление запаздывающего звена в технологической системе дает дополнительные трудности в управлении и регулировании технологического процесса, снижается запас устойчивости, ухудшаются качественные показатели переходных процессов.

В подавляющем большинстве случаев, отставание негативно сказывается на общей динамике системы, в результате чего возникают трудности со стабильностью и качеством управления [1-2].

В некоторых случаях нельзя игнорировать задержку транспортировки на пункте досмотра. Поэтому организации с отложенными технологическими процессами в своих отраслях вынуждены искать пути выхода из ситуации. Находят такие методы регулирования и контроля, которые учитывают специфику систем с транспортной задержкой [3-4].

Целью данной работы является исследование на лабораторном стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием, где в качестве звена с запаздыванием выступает незаполненный трубопровод для перемещения жидкостного материала.

Для реализации поставленной цели, необходимо выполнить следующие задачи:

- идентифицировать стенд физического подобия, как объект управления с апериодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием;
- смоделировать работу системы с запаздыванием, включающие в себя регулятор Смита и ПИД регулятор:
- разработать программу управления, реализующую предиктор Смита и ПИД регулятор;
- сравнить результаты и сделать выводы об возможности применения регуляторов в технологических процессах с транспортным запаздыванием.

1 Литературный обзор

1.1 Технологические процессы с транспортным запаздыванием

Значительную долю в промышленности занимают объекты с транспортным запаздыванием. Таких примеров можно привести множество. В основном это производства, где составные части технологического процесса, находятся на расстоянии друг от друга достаточным для того, чтобы в технологическом процессе появилось звено запаздывания.

Примером технологического процесса с транспортным запаздыванием является процесс транспортировки сыпучих материалов.

В данном случае процесс начинается с погружения материала в бункер, откуда он попадает через устройство дозатора на ленточный транспортер, в ходе перемещения материала по ленточному транспортеру материал попадает в следующий необходимый узел технологического процесса рисунок 1.1 [5].

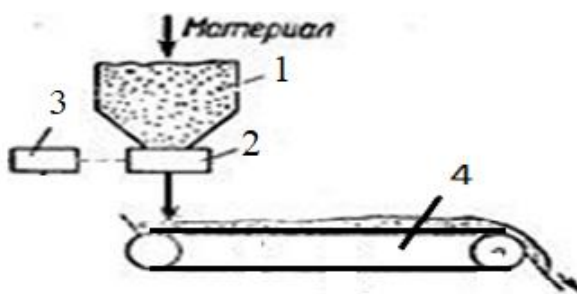


Рисунок 1.1 – Процесс перемещения сыпучих материалов: 1 – устройство погружения (бункер); 2 – дозирующее устройство; 3 - вариатор; 4 - ленточный транспортер

Отличным примером технологического процесса с транспортным запаздыванием является характерный для нефтедобывающих стран – транспортировка нефти. Магистральный трубопроводный транспорт предназначен для транспортировки продукции (нефтепродуктов, газа, широких фракций лёгких углеводородов), от точки приёма нефти до точки её передачи. Магистральный трубопровод – это комплекс состоящий из труб, которые могут быть подземными и надземными, а также могут проходить под водой (под реками и озерами).

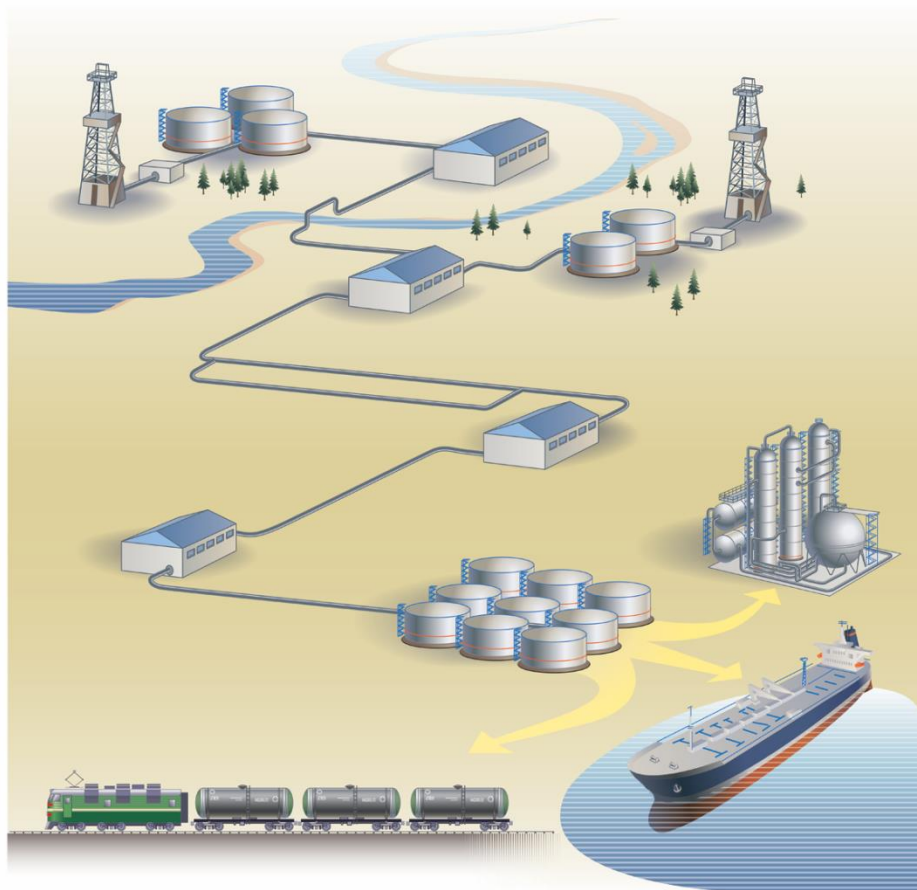


Рисунок 1.2 - Схема технологического процесса транспортировки нефти

Работа нефтеперекачивающих станций является причиной появления давления, которое необходимо в трубах для того, чтобы осуществлять транспортировку нефти с определенной технологической скоростью. Назначение всех станций на пути следования траектории магистрального трубопровода, взять нефть из области низкого давления, что расположено перед станцией и принудительно дренировать в область высокого давления, после станции. Данную функцию выполняют устройства насосные подпорные станции. На рисунке 1.2 показана головная нефтеперекачивающая станция, находящаяся в начале нефтепровода, и промежуточные нефтеперекачивающие станции, расставленные по технологическому тракту нефтепровода через определенные промежутки расстояния. В общем случае можно сказать, что создаваемого нефтеперекачивающей станцией давления должно хватить для транспортировки нефти с заданным расходом до следующей нефтеперекачивающей станции. Промежуточные

нефтеперекачивающие станции увеличивают давление транспортируемой нефти в нефтепроводе, которая поступает с прошлых линейных участков, делая нефтепродукты достаточно способными для продвижения нефти до следующего участка и так до конечного пункта нефтепровода, это может быть резервуарный парк, перевалочная точка, или морской порт, где нефть транспортируется дальше или используется в каком-либо технологическом процессе.

1.2 Идентификация объекта управления

Для разработки автоматизированных систем управления нужно правильно выделить объект управления. В данной работе объектом управления является стенд физического подобия с апериодическим звеном первого порядка с чистым запаздыванием.

Идентификация объекта автоматизированных систем управления технологическими процессами осуществляется на основе наблюдения, с применением экспериментальных и аналитических методов. При этом имеется возможность использовать математическую модель как на этапе разработке объекта, так и на этапе его эксплуатации.

Построение математической модели производится различными методами, в том числе: аналитическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим [6-9].

Аналитический метод предполагает, что сбор информации об объекте осуществляется на основе законов физики, механики и других наук. Метод показывает хорошие результаты, если объект управления хорошо изучен. Если объект управления сложен и невозможно в полном объеме собрать информацию, то применяют экспериментальный метод. Он основывается на сборе и обработке статистики об особенностях технологического процесса. При экспериментально-аналитическом методе, модель, полученная аналитическим путем, уточняется в процессе экспериментов [19].

При получении полной информации об объекте, соответственно возможно получить достаточные и достоверные результаты. При отсутствии

достаточных данных об объекте описание математической модели выглядит сложно и, зачастую, невозможно. В таком случае прибегают к экспериментальным методам.

Основная задача идентификации заключается в определении передаточной функции объекта, преобразующей входные сигналы в выходные. Выделяют структурную и параметрическую идентификацию. Через структурную идентификацию определяет вид математической модели (передаточной функции). Через параметрическую идентификацию определяются числовые параметры математической модели.

В качестве примера рассмотрим рисунок 1.3. На нём представлено взаимодействие объекта с окружающей средой. На рисунке стрелками u и f изображены различные воздействия внешних факторов на объект. Выходная величина в данном случае была обозначена « y » (указана стрелкой в направлении от объекта).



Рисунок 1.3 – Схема взаимодействия объекта с внешними воздействиями

При создании модели необходимо:

- 1) определить условия сбора информации об объекте;
- 2) определить класс модели, которая наиболее подходит для конкретного случая;
- 3) рассчитанная математическая модель не всегда может быть схожа с исследуемой реальной системой, таким образом, более правильным будет обращать внимание на схожесть выходных параметров модели и объекта, а также необходимо минимизировать ошибку;

4) определить параметры: коэффициенты разностных, интегральных, дифференциальных уравнений, или вовсе конструкций линейной модели объекта, так как данные параметры входят в математическую модель;

5) завершающий этап, прежде чем использовать модель, важным моментом является ее оценка на адекватность к реальному объекту.

1.2.1 Пропорционально-интегро-дифференцирующие регуляторы

Сегодня существует множество математических алгоритмов управления. Одним из самых распространенных в силу своей универсальности является ПИД (пропорционально-интегро-дифференцирующий) регулятор [21].

В настоящее время ПИД регуляторы становятся все наиболее часто используемыми в автоматизированных системах (в 95% технологических процессах, где существует потребность в регулирующих контурах). Это связано с тем, что данные регуляторы позволяют достигать поставленных целей управления для большинства технологических объектов, они имеют компактную и простую структуру. В последнее время еще и добавились нововведения, которые позволяют бороться с насыщением интегральной составляющей регулятора [22-24].

ПИД-регулятор используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью достижения двух показателей: точности и качества переходного процесса. Данный регулятор представляет собой универсальный механизм с обратной связью, широко используемый в промышленной системе управления. Данный контроллер способен свести к минимуму ошибку, регулируя вход управления [25].

Алгоритм ПИД-регулятора включает в себя три параметра, называемые пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) значениями. Эти значения можно интерпретировать с точки зрения времени. В данном регуляторе пропорциональный коэффициент - обеспечивает общее управляющее воздействие пропорционально сигналу ошибки. Интегральный параметр - уменьшает стационарные ошибки за счет низкочастотной

компенсации интегратором. Дифференцирующий параметр - улучшает отклик за счет высокочастотной компенсации дифференциатором. П-значение зависит от текущей ошибки, И-значение - от накопления прошлой ошибки, а Д-значение – это прогноз будущей ошибки, основанный на текущей скорости изменения [26].

Отдельное влияние этих трех составляющих на производительность замкнутого цикла суммировано в таблице 1.1. Для более лучшей настройки коэффициентов K_p , K_i , K_D желательно обратиться к таблице, в которой приведены взаимосвязи в настройке.

Таблица 1.1 – Настройки коэффициентов K_p , K_i , K_D

Замкнутый ответ	Время нарастания	Перерегулирование	Стабильность
Увеличение K_p	Увеличение	Увеличение	Ухудшение
Увеличение K_i	Небольшое уменьшение	Увеличение	Ухудшение
Увеличение K_D	Небольшое уменьшение	Снижение	Улучшение

В работе системы управления возможны колебания сигнала. Это требует медленных и устойчивых изменений на выходе контроллера. Полный ПИД-регулятор, по сравнению с ПИ-регулятором, позволяет проводить изменения заданных значений в процессе эксплуатации объекта [27-29].

Структурная схема классической системы ПИД-управления показана на рисунке 1.4.

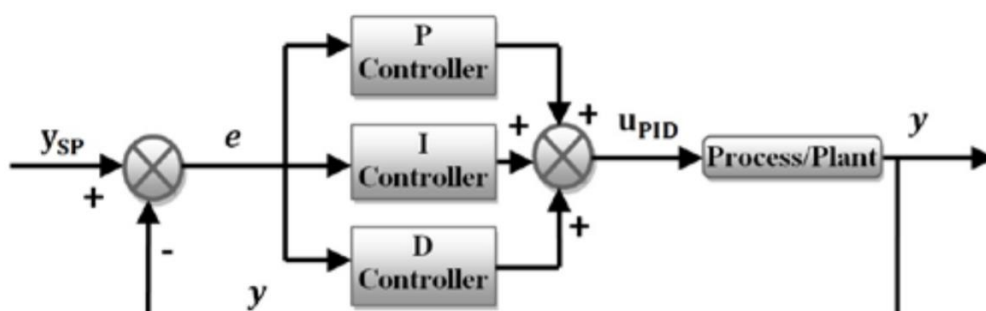


Рисунок 1.4 – Система регулирования с ПИД-регулятором

Выходной сигнал классического ПИД-регулятора, как показано на рисунке, определяется по формуле 1.4 [30]:

$$u_{PID}(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de}{dt} \quad (1.1),$$

где $e(t)$ – ошибка, K_c – коэффициент пропорциональности (константа), τ_I – интегральная постоянная времени, τ_D – дифференциальная постоянная времени, U_{PID} – выход классического ПИД-регулятора [31-33].

Закон регулирования представлен ниже:

$$W_p(p) = \frac{K_p + K_p}{T_i + K_d \cdot T_{DP}} \quad (1.2),$$

где K_p – пропорциональный коэффициент, T_i – интегральный коэффициент, K_d – дифференциальный коэффициент.

Закон регулирования формируется благодаря параллельной (рис. 1.5б) или последовательной (рис. 1.5а) корректировке ПИ-регулятора посредством реального дифференцирующего звена. В обоих случаях ПИД-закон является приближенным.

В корректировке происходящей последовательно:

$$W_{PID}^*(p) = \left[\frac{K_d T_{DP}}{(1 + T_{DP})} + 1 \right] \frac{K_p}{T_{ip}} (1 + T_{ip}) = \frac{1}{1 + T_{DP}} \left(K_p^* + \frac{K_p}{T_{ip}} + K_p T_{DP}^* \right) \quad (1.3)$$

Где,

$$K_p^* = K_p \left[1 + \frac{T_d}{T_i} (1 + K_d) \right]; \quad T_d^* = T_d (1 + K_d)$$

В происходящей параллельно корректировке:

$$\begin{aligned} W_{PID}^*(p) &= \frac{K_p (1 + T_{ip})}{T_{ip} \left[1 + \frac{K_d T_{DP}}{1 + T_{DP}} \cdot \frac{K_p}{T_{ip}} (1 + T_{ip}) \right]} = \\ &= \frac{1}{1 + T_{ip}^*} \left[K_p^* \left(1 + \frac{T_d}{T_i} \right) + \frac{K_p^*}{T_{ip}} + K_p^* T_{DP} \right], \end{aligned} \quad (1.4)$$

Где

$$K_p^* = \frac{K_p}{\left(1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i}\right)} ; \quad T^* = T_d \frac{1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i}}{1 + K_p K_d \frac{T_d}{T_i}} \quad (1.5)$$

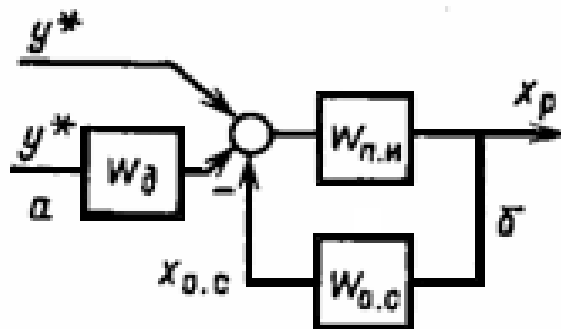


Рисунок 1.5 – Изображение, последовательной - а и параллельной коррекции – б

На рисунке 1.6 представлены переходные характеристики ПИД-регуляторов.

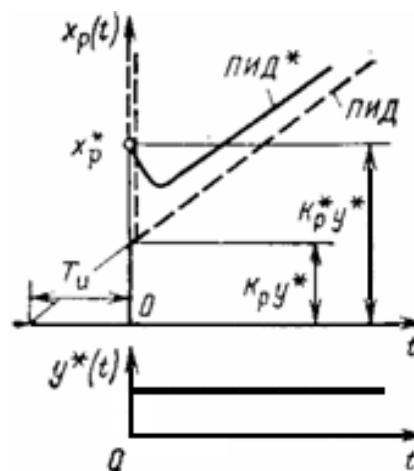


Рисунок 1.6 – Переходные характеристики ПИД-регуляторов

ПИД-регулятор имеет несколько параметра: K_p , T_i , T_d и K_d . Данные параметры являются следствием экспериментальных кривых разгона ПИ-регулятора и реального дифференцирующего звена. Параметры настройки ПИД-регулятора K_p^* и T^* можно определить формулами (1.5). На рисунке 1.6 приведена кривая разгона ПИД-регулятора.

Таким образом можно сказать, что первая составляющая ПИД – регулятора, то есть пропорциональная составляющая способна вырабатывать

выходной сигнал, который в свою очередь противодействует отклонению регулируемому значению от заданной величины, чем больше заданное значение, тем больше будет отклонение. Вторая составляющая, интегрирующая составляющая пропорциональна интегралу по времени, она избавляется от статистической ошибки (величина сигнала стабилизируется на заданном значении, если нет внешних возмущений). Третья составляющая, дифференцирующая составляющая пропорциональна динамике изменения отклонения регулируемой величины (предназначена для создания противовеса отклонениям от заданных значений).

1.2.2 Методики настройки ПИД-регулятора

Как было указано ранее, система с ПИД-регулятором должна быть точной, но на практике, большая часть промышленных процессов работает нелинейно, изменчивость параметров и неопределенность моделей очень высоки, поэтому при использовании обычного ПИД-регулирования точное управление процессом не может быть достигнуто. Проблема может быть хорошо решена путем применения гибких вычислительных методов для настройки ПИД-регулятора. Они особенно полезны для решения сложных в вычислительном отношении задач и математически прослеживаемых в источнике.

В таблице 1.2 представлены наиболее часто встречаемые и перспективные методы настройки ПИД-регуляторов.

Таблица 1.2 – Методы настройки ПИД-регулятора

Метод	Преимущества	Недостатки
Ручная настройка	Не требуются математические вычисления	Требуется высококвалифицированный персонал
Циглера-Николса	Метод проверен временем	Могут возникать ошибки Достаточно жесткий метод настройки

Коэна-Куна	Хорошие модели процессов	Используется только для процессов первого порядка
------------	--------------------------	---

1.2.3 Метод Циглера-Никольса

Метод Циглера-Никольса появился еще в 1942 году, и был официально опубликован как метод для расчета ПИД-регуляторов. Он является эмпирическим и использует экспериментальные данные. Это, безусловно, самый популярный метод настройки в использовании и до сих пор является простым, довольно эффективным методом настройки ПИД-регуляторов.

Для фиксации системы на границе устойчивости (для фиксации k_{Π}^*), следует увеличить K_{Π} , то есть установить неизменную амплитуду колебаний. При коэффициенте регулятора k_{Π}^* , система остается на границе устойчивости. В установившейся системе колебаний графо-аналитически измеряют период T^* . Значения параметров регулятора рассчитываются по формулам из таблицы 1.3 [34].

Таблица 1.3 – Типовые параметры регуляторов

	k_{Π}	k_{Π}	k_{Π}
П-регулятор	$0,50 k_{\Pi}^*$		
ПИ-регулятор	$0,45 k_{\Pi}^*$	$0,54 k_{\Pi}^*/T^*$	
ПИД-регулятор	$0,60 k_{\Pi}^*$	$1,2 k_{\Pi}^*/T^*$	$0,075 k_{\Pi}^*T^*$

Во втором варианте этого метода ключевым звеном является реакция объекта на изменение управляющего воздействия.

Данную характеристику называют кривой разгона. Объекты имеющие апериодическую кривую, как на рисунке 1.9, на котором представлена кривая разгона объекта с запаздыванием, которые могут быть интерпретированы как последовательное соединение апериодического звена и звена чистого запаздывания.

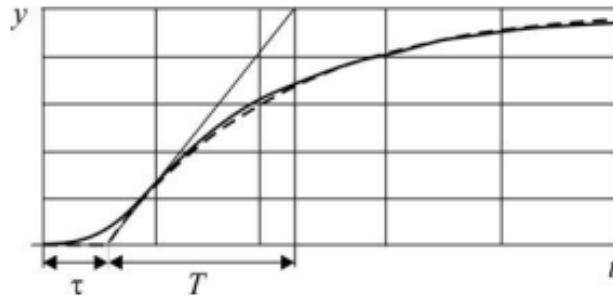


Рисунок 1.7 – Ступенчатое воздействие при реакции объекта

Здесь передаточная функция имеет вид:

$$W_o(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (1.6)$$

где k – коэффициент передачи, T – постоянная времени, τ – время запаздывания.

Благодаря выше указанным параметрам k , T , τ , ведутся расчеты регулятора. Формулы для параметров регулятора приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры регулятора

	$k_{\text{п}}$	$k_{\text{и}}$	$k_{\text{д}}$
П-регулятор	$T/k\tau$		
ПИ-регулятор	$0,9T/k\tau$	$0,3T/k\tau^2$	
ПИД-регулятор	$1,2T/k\tau$	$0,6T/k\tau^2$	$0,6T/k$

При данном методе, удовлетворительные результаты получаются при $0,15 < \tau/T < 0,6$.

Методом Циглера-Николса [34-37] всегда существует необходимость дальнейшей настройки, потому что полученные настройки контроллера являются довольно «агрессивными» и, таким образом, приводят к чрезмерному превышению и колебательному отклику. Также для первого метода параметры довольно сложно оценить в шумной обстановке. Во втором

методе, поскольку система движется к неустойчивости при определении параметров, практически это может быть весьма вредным для системы.

Регуляторы, рассчитанные с помощью метода Циглера – Никольса, не всегда способны обеспечить качество процесса регулирования. Несмотря на это, метод Циглера–Никольса имеет свою популярность, именно поэтому ряд производителей рекомендуют их для настройки регуляторов.

1.3 Влияние запаздывания на устойчивость системы управления

Для того чтобы увидеть влияние запаздывания на систему смоделируем работу двух одинаково настроенных систем, разница лишь будет состоять в присутствии в одной из них звена запаздывания, системы (а) и (б) (рисунок 1.8).

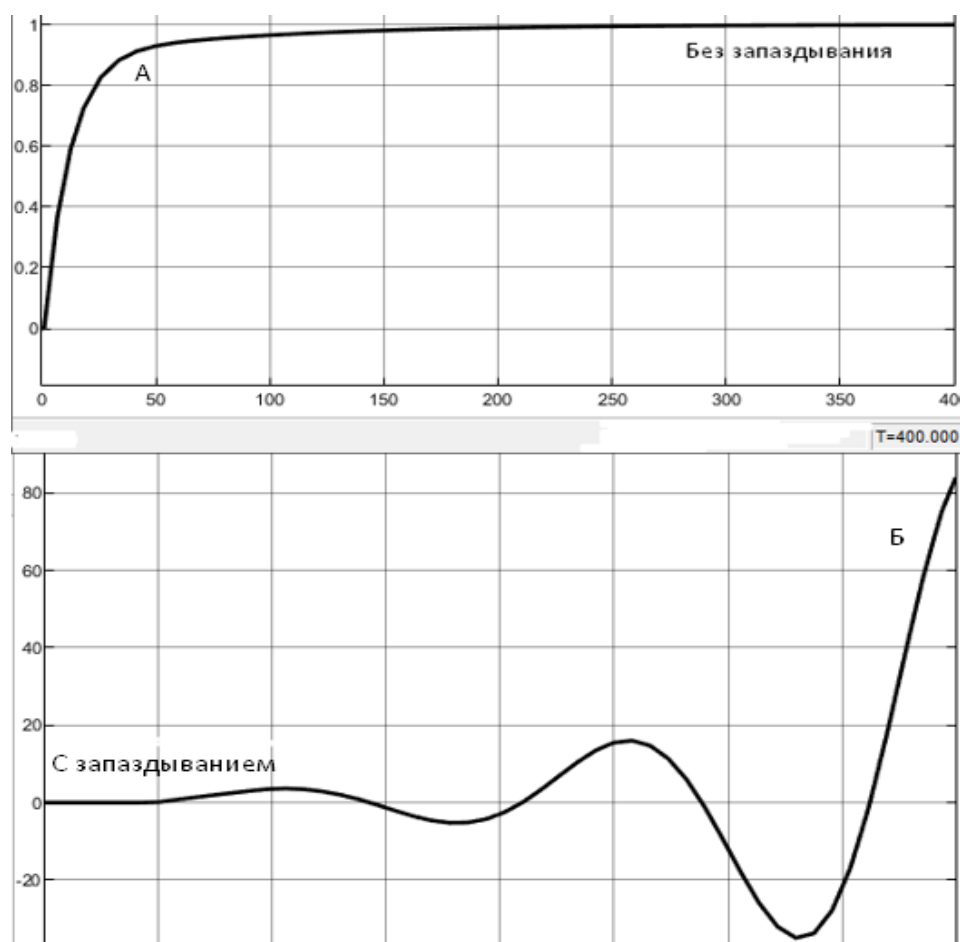


Рисунок 1.8 – Система без запаздывания содержащая ПИД регулятор (а), с системой с запаздыванием содержащая ПИД регулятор (б)

Из данного сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что звено запаздывания негативно влияет на систему. На рисунке 1.8б видно, где система становится неустойчивой.

Системы автоматического управления (САУ) могут иметь звенья, у которых зависимость между выходной и входной характеристиками имеет вид: $y(t) = u(t - \tau)$, где τ — постоянная величина, называемая временем запаздывания.

Так как данные звенья могут воспроизводить входную величину (с некоторым запаздыванием), их стали называть запаздывающими. На рисунке 1.9 представлена одноконтурная структура САУ со звеном запаздывания.

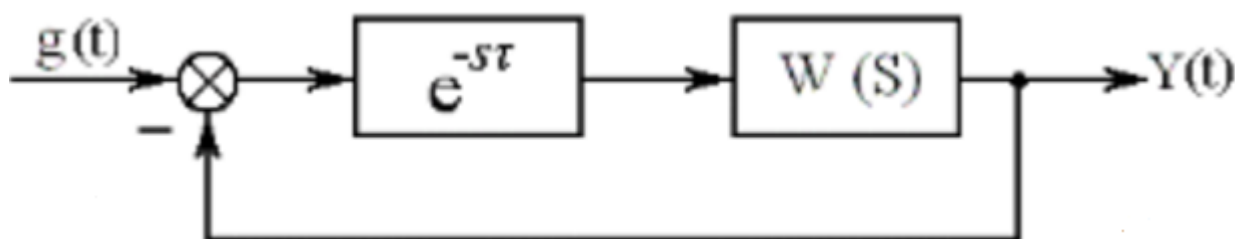


Рисунок 1.9 - система автоматического управления с запаздыванием

Передаточная функция звена запаздывания:

$$W_{\text{зап}}(S) = e^{-s\tau} \quad (1.7)$$

Примерами, в которых можно обнаружить звенья с запаздыванием, могут служить технологические процессы где происходит перемещение из одной точки в другую продуктов производства или материалов. Процессы в данных САУ можно описывать дифференциально разностными уравнениями, САУ которые имеют в себе хотя бы одно звено запаздывания характеризуют как САУ с запаздыванием. Благодаря передаточным функциям систем с сосредоточенными параметрами и системам высокого порядка с сосредоточенными параметрами, появляется возможность аппроксимировать передаточные функции сложных систем. Структуру со звеном в прямой цепи можно представить, как на рисунке 1.9.

Разомкнутая система с запаздывающим звеном представляется передаточной функцией:

$$W_{\tau}(s) = W_{\text{зап}}(s)W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)}e^{-s\tau} \quad (1.8)$$

где $W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)}$ — дробно рациональная функция оператора S (без звена запаздывания, если есть множество звеньев запаздывания то они складываются).

Передаточную функцию замкнутой системы (если в прямой цепи находится звено запаздывания), можно представить, как:

$$W_{gx}(p) = \frac{W_{\tau}(s)}{1+W_{\tau}(s)} = \frac{R(s)e^{-s\tau}}{Q(s)+R(s)e^{-s\tau}} = \frac{R_{\tau}(s)}{D_{\tau}(s)} \quad (1.9)$$

Из выше упомянутого выражения (1.21) можно сказать, что звено запаздывания влияет на характеристическое уравнение:

$$D_{\tau}(s) = Q(s) + R(s)e^{-s\tau} \quad (1.10)$$

По выше упомянутому характеристическому выражению, можно утверждать, что оно трансцендентное (является выражением «бесконечной степени») так как имеет бесконечное количество корней. В связи с тем, что:

$$e^{-s\tau} = 1 - s\tau + \frac{s^2\tau^2}{2!} - \frac{s^3\tau^3}{3!} + \dots,$$

Для устойчивости систем с запаздыванием, необходимо, чтобы найденные корни были левыми, но, к сожалению, обнаружение корней уравнения проблематично, в связи с этим при их обнаружении пользуются критериями устойчивости, например, критериями устойчивости Найквиста или Михайлова.

Чтобы получить выражение для годографа Михайлова необходимо подставить $s=j\omega$ в характеристическое уравнение:

$$D_{\tau}(j\omega, e^{j\omega\tau}) = Q(j\omega) + R(j\omega)e^{-j\omega\tau} \quad (1.11)$$

С помощью критерия Михайлова, к сожалению, график кривой Михайлова становится трудным для восприятия и формулировка этого критерия не такая простая из-за присутствия $e^{-j\omega\tau}$, и тогда более удобный критерий – критерий Найквиста.

Информацию о том, устойчива ли система, можно получить исходя из амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) $W_{\tau}(j\omega)$ системы относительно точки $(-1; j0)$. Частотную передаточную функцию $W_{\tau}(j\omega)$ системы с запаздыванием находят, подставляя $s = j\omega$ в выражение:

$$W_{\tau}(s) = W_{\text{зап}}(s)W(s) = \frac{R(s)}{Q(s)}e^{-s\tau} \quad (1.12)$$

Откуда можно утверждать, что:

$$W_{\tau}(j\omega) = W_{\text{зап}}(j\omega)e^{-j\omega\tau} = A(\omega)e^{-s\omega\tau}e^{j\varphi(\omega)} = A(\omega)e^{j\varphi_{\tau}(\omega)} \quad (1.13)$$

где $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ - АФХ системы без учета запаздывания; $A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$ - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega) = \text{Arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ - фазочастотная характеристика (ФЧХ) разомкнутой системы без учета запаздывания; $\varphi_{\tau}(\omega) = \varphi(\omega) - \omega\tau$ - фазочастотная характеристика (ФЧХ) разомкнутой системы с запаздыванием.

Из $W_{\tau}(j\omega) = W_{\text{зап}}(j\omega)e^{-j\omega\tau} = A(\omega)e^{-s\omega\tau}e^{j\varphi(\omega)} = A(\omega)e^{j\varphi_{\tau}(\omega)}$ и $\varphi_{\tau}(\omega) = \varphi(\omega) - \omega\tau$ видно, что присутствие звена запаздывания не изменяет модуля $A(\omega)$ АФХ системы $W_{\tau}(j\omega)$, а приносит только добавочный отрицательный сдвиг по фазе $\omega\tau$ пропорциональный частоте, при этом коэффициентом пропорциональности является время запаздывания τ .

Зная АФХ $W(j\omega)$ системы без запаздывания, легко построить АФХ $W_{\tau}(j\omega)$ системы с запаздыванием. Для этого каждый модуль $A(\omega_j)$ вектора АФХ $W(j\omega)$ нужно повернуть на угол $\omega_j\tau$ по часовой стрелке. С ростом частоты ω угол $\omega\tau$ будет быстро расти, а

модуль $A(\omega)$ обычно уменьшается, поэтому амплитудно-фазовая характеристика $W_\tau(j\omega)$ разомкнутой системы с запаздыванием имеет вид спирали, закручивающейся вокруг начала координат, что показано на рисунке 1.10.

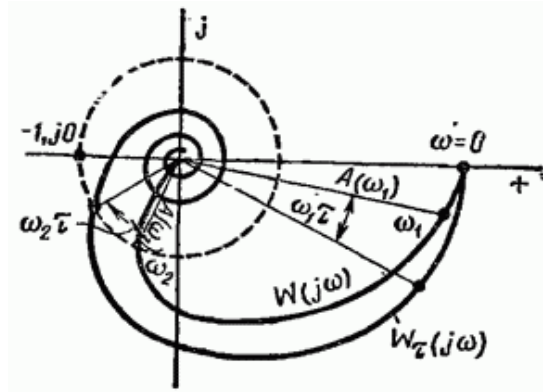


Рисунок 1.10 - АФХ $W_\tau(j\omega)$

«Закручивание» АФХ из-за присутствия дополнительного фазового сдвига $\omega\tau$, ухудшает устойчивость системы, так как вся АФХ приближается к критической точке $(-1, j0)$. Однако, иногда при сложной форме АФХ $W(j\omega)$ введение постоянного запаздывания может улучшить условия устойчивости. Меняя запаздывания τ , возможно получить значение, при котором система окажется на границе устойчивости, тогда характеристика $W_\tau(j\omega)$ будет проходить через точку $(-1, j0)$. Время запаздывания $\tau_{кр}$ и соответствующее ему значение частоты $\omega_{кр}$ при которых $W_\tau(j\omega)$ проходит через точку $(-1, j0)$ называют критическими и для такого критического случая существует условие:

$$W_\tau(j\omega_{кр}) = W(j\omega_{кр})e^{-j\omega_{кр}\tau_{кр}} = A(\omega_{кр})e^{j[\varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр}]} = -1 \quad (1.14)$$

Откуда можно записать отдельно для амплитуд и фаз вектора $W_\tau(j\omega_{кр})$:

$$A(\omega_{кр}) = |W_\tau(j\omega_{кр})| = 1, \quad (1.15)$$

$$\varphi_\tau(\omega_{кр}) = \varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр} = -\pi(2j + 1) \text{ где } j=0, 1, 2, \dots$$

Из $A(\omega_{кр}) = |W_\tau(j\omega_{кр})| = 1$ можно найти сначала $\omega_{кр}$ а затем из $\varphi_\tau(\omega_{кр}) = \varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр} = -\pi(2j+1)$ найти $\tau_{кр}$ т. е.

$$\tau_{кр} = \frac{\varphi(\omega_{кр}) + \pi(2j+1)}{\omega_{кр}} = \frac{\pi + \varphi(\omega_{кр})}{\omega_{кр}} + \frac{2\pi}{\omega_{кр}}j, \quad (1.16)$$

Для САУ с запаздыванием основное значение имеет минимальное критическое время запаздывания (при $j=0$), которое является в то же время и граничным:

$$\tau_{кр} = \frac{\varphi(\omega_{кр}) + \pi}{\omega_{кр}} = \frac{\pi + \text{Arctg} \frac{V(\omega_{кр})}{U(\omega_{кр})}}{\omega_{кр}} = \frac{\varphi(\omega_{кр})}{\omega_{кр}} \quad (1.17)$$

где $\varphi(\omega_{кр}) = \pi + \text{Arctg} \frac{V(\omega_{кр})}{U(\omega_{кр})}$ — запас устойчивости по фазе.

При сложном выводе выражения $W(j\omega)$ определение критического времени запаздывания легче всего выполнить графически. Условие $A(\omega_{кр}) = |W_\tau(j\omega_{кр})| = 1$ определяется пересечением годографа $W(j\omega)$ с окружностью единичного радиуса с центром в начале координат (рисунок 1.11).

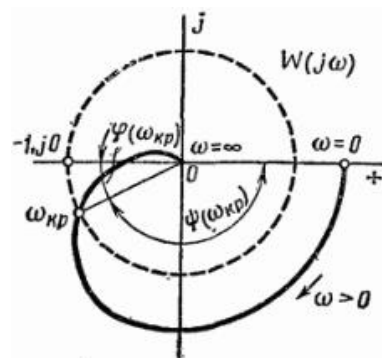


Рисунок 1.11 - Годограф $W(j\omega)$

Точка пересечения определяет одновременно $\omega_{кр}$ и угол $\varphi(\omega_{кр})$, который, будучи разделен на $\omega_{кр}$, даст значение критического времени запаздывания. Если имеется несколько точек пересечения годографа $W(j\omega)$ с окружностью единичного радиуса, например при $\omega_{1кр}$, $\omega_{2кр}$ и $\omega_{3кр}$, (рисунок

1.12), то система будет иметь несколько критических граничных времен запаздывания:

$$\tau_{1кр} = \frac{\varphi(\omega_{1кр})}{\omega_{1кр}}; \tau_{2кр} = \frac{\varphi(\omega_{2кр})}{\omega_{2кр}}; \tau_{3кр} = \frac{\varphi(\omega_{3кр})}{\omega_{3кр}}$$

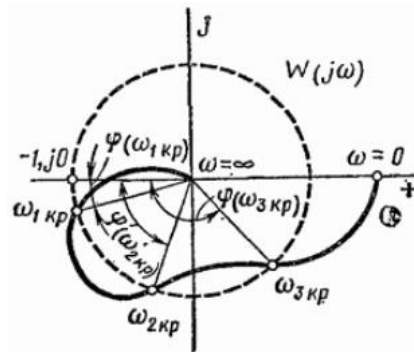


Рисунок 1.12 – Годограф $W(j\omega)$ при нескольких критических граничных времен запаздывания

При этом минимальное время запаздывания равно $\tau_{кр min} = \tau_{1кр}$.

Система будет устойчива при $\tau < \tau_{1кр}$, а также при $\tau_{2кр} < \tau < \tau_{3кр}$.

Система будет неустойчива при $\tau_{1кр} < \tau < \tau_{2кр}$, а также при $\tau > \tau_{3кр}$.

Наблюдаемое в этом случае чередование участков устойчивости и неустойчивости системы при непрерывном изменении τ является отличительной особенностью систем с запаздыванием.

Очень часто для повышения быстродействия и точности системы время запаздывания τ стремятся уменьшить, поэтому критерий устойчивости формулируется лишь для минимального времени запаздывания. САУ будет устойчива, если время запаздывания τ меньше минимального критического времени запаздывания: $\tau < \tau_{кр min}$.

Стоит отметить, что критическое время запаздывания находят даже тогда, когда используются логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) характеристики и ФЧХ характеристики, но тогда

вместо окружности единичного радиуса представляют ось абсцисс, и ЛАЧХ системы без запаздывания совпадает с ЛАЧХ системы с запаздыванием. Фазовый сдвиг определяют из выражения $\varphi_{\tau}(\omega) = \varphi(\omega) - \omega\tau$. Точки пересечения ЛАЧХ с осью абсцисс определяют критические частоты $\omega_{jкр}$, а запасы по фазе (с учетом кратности), отнесенные к соответствующим критическим частотам, определяют критические времена запаздывания $\tau_{jкр}$.

1.4 Регулятор Смита для систем с запаздыванием

Временные задержки являются обычным явлением во многих производственных процессах, и они вызывают осложнения связанные с управлением процессами. ПИД - регуляторы часто неэффективны для управления такими процессами, поскольку для поддержания стабильности замкнутого контура требуется тщательная настройка коэффициентов. Смит представил компенсатор задержки, который более широко известен сейчас как предиктор Смита.

Контроллер включает в себя модель процесса, что позволяет прогнозировать переменные процесса, и контроллер может быть спроектирован так, как если бы процесс был свободным от задержек. Предиктор Смита предлагает улучшение в производительности замкнутого контура по сравнению с обычными контроллерами, и он был распространен на многопараметрические системы с задержками. Однако, как и другие основанные на моделях системы управления, контроллер Смит-предиктор требует очень точной модели процесса. При несоответствии между моделью и фактическим процессом производительность замкнутого цикла может быть очень низкой. Фактически было показано, что системы Смита могут стать нестабильными даже при бесконечно малых возмущениях в «универсальных счетах» для выбора ширины полосы замкнутого контура, учитывая неопределенность, связанную с временем простоя процесса. Тем не менее, во всех этих исследованиях не учитывалось влияние одновременных неопределенностей в коэффициенте усиления, постоянной времени и времени простоя на надежность работы контроллеров-предикторов Смита [42-43].

Предиктор Смита – это регулятор способный предсказать сигнал на выходе. Для этого он может использовать модель объекта, которая в свою очередь состоит из M_0 и задержки e^{-sL} (рисунок 1.13). Благодаря этому, существует возможность исключить задержку и возможно до появления сигнала на выходе понять поведение объекта. Данный факт говорит о том, что реализация возможна системой, представленной на рисунке 1.13, где R - ПИД-регулятор, $P_0 e^{-sL}$ - передаточная характеристика объекта.

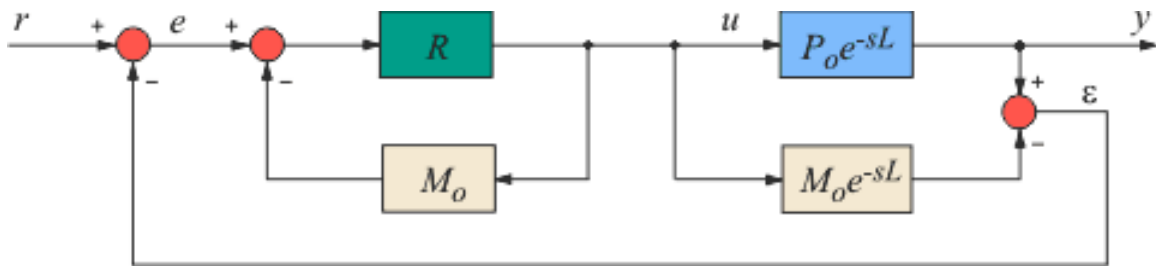


Рисунок 1.13 – Система с предиктором Смита

Исходя из того, что предполагаем модель точна, то разность сигналов на выходах модели и объекта равна нулю, $\varepsilon = 0$, тогда из рисунка 1.13 получаем:

$$y = P_0 e^{-sL} \left(\frac{R}{1 + R M_0} \right) r = \left(\frac{P_0 R}{1 + P_0 R} e^{-sL} \right) r \quad (1.18)$$

Здесь $\frac{P_0 R}{1 + P_0 R}$ - функция без транспортной задержки. Это говорит о том, что звено с задержкой отсутствует в контуре ОС и не влияет на устойчивость и быстродействие системы, в связи с тем, что происходит регулирование в контуре без задержки.

Рассмотрим теперь работу предиктора без варианта, в котором разность не равна нулю, это можно описать следующей системой уравнений:

$$y = P_0 e^{-sL} R(r - \varepsilon - M_0 u), \quad \varepsilon = y - M_0 e^{-sL} u, \quad y = P_0 e^{-sL} u, \quad (1.19)$$

Из чего следует:

$$y = \left[\frac{P_o R}{1 + R M_o + R(P_o - M_o)e^{-sL}} r \right] e^{-sL} \quad (1.20)$$

Очевидно, что с ростом разности $P_o - M_o$ в знаменатель стремится к нулю и из передаточной функции исключается звено задержки, которая только добавляется к результату.

Рассмотрим более подробно вывод передаточной функции регулятора Смита:

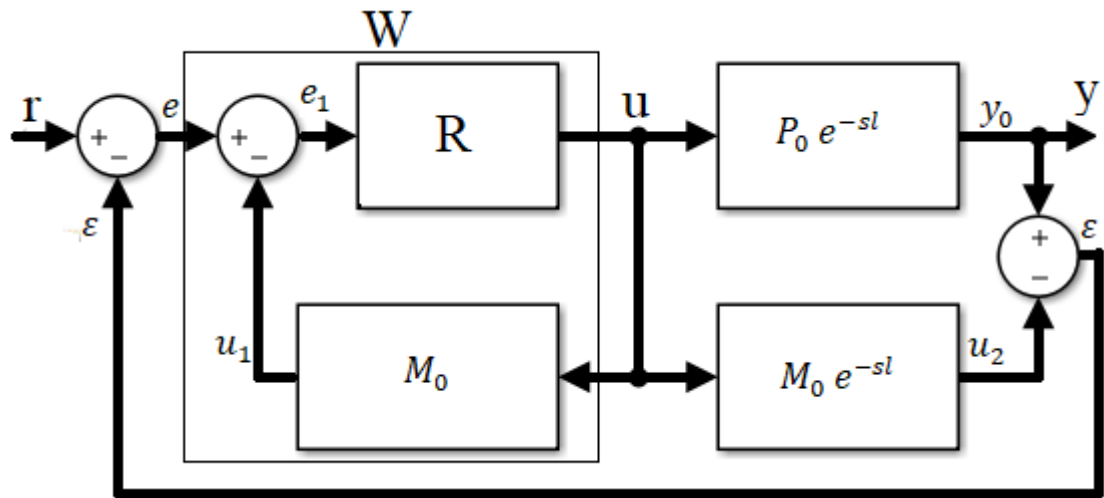


Рисунок 1.14 – структура регулятора Смита

Если посмотреть на часть структурной схемы, которая обозначена за W на рисунке 1.14, то можно увидеть, что данная часть схемы состоит из дробно-рациональной части M_o и ПИД регулятора R, найдем W:

$$e_1 = e - u_1, u = R \cdot e_1, u_1 = u \cdot M_o, \frac{u}{R} = e - u \cdot M_o, u \cdot \left(\frac{1}{R} + M_o \right) = e,$$

$$W = \frac{u}{\varepsilon} = \frac{R}{1 + R \cdot M_o}, (1.21)$$

После обнаружения W, отредактируем структурную схему для удобства:

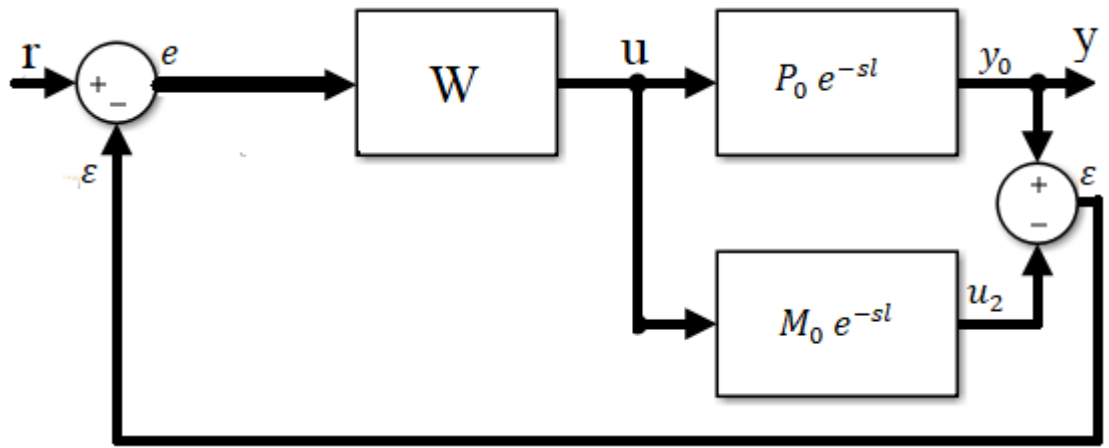


Рисунок 1.15 – структура регулятора Смита

Далее найдем $W_{\text{общ}}$, которое состоит из ранее найденного W , передаточной характеристики объекта управления с задержкой $P_0 \cdot e^{-sl}$ и передаточной характеристики модели объекта с задержкой $M_0 \cdot e^{-sl}$.

$$y_0 = u \cdot P_0 e^{-sl}, u_2 = u \cdot M_0 e^{-sl}, \varepsilon = y_0 - u_2 = u \cdot P_0 \cdot e^{-sl} - u \cdot M_0 \cdot e^{-sl} = u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl}), e = r - \varepsilon, y = y_0 = u \cdot P_0 \cdot e^{-sl}, y = u \cdot P_0 \cdot e^{-sl}, u = W \cdot (r - \varepsilon), \varepsilon = u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl}), u = W \cdot (r - u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})), u = W \cdot r - W \cdot u \cdot (P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl}), u \cdot (1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})) = \frac{W \cdot r}{1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})}, u = \frac{W \cdot r}{1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})},$$

$$W_{\text{общ}} = \frac{W \cdot P_0 \cdot e^{-sl}}{1 - W(P_0 \cdot e^{-sl} - M_0 \cdot e^{-sl})}, (1.22)$$

Где

$$W = \frac{R}{1 + R \cdot M_0}, R - \text{передаточная функция ПИД регулятора.}$$

2 Объект и методы исследования

2.1 Описание стенда физического подобия технологического процесса и средств исследования

В данной работе используется объект, представленный на рисунке 2.1, который в свою очередь состоит из двух емкостей: емкость E1 - основная, емкость E2 – вспомогательная. В основную емкость встроен датчик жидкостного уровня (3), который измеряет давление столба жидкости.

Насос (8) обеспечивает переливание жидкости по трубопроводу (4) в основную из вспомогательной емкости. Жидкость во вспомогательной емкости вновь оказывается посредством открытия шарового клапана (5) и слива из основной. Незаполненный трубопровод выполняет функции звена с чистым запаздыванием. Формирование аналогового выходного сигнала происходит вследствие поступления результатов измерений в регулятор, где сигнал непосредственно поступает в частотный преобразователь. Данный преобразователь производит управление производительностью насоса, изменяя частоту, изменяет производительность насоса. Для данного объекта возмущающими воздействиями являются величина регулируемой величины, (ее задает регулятор) и величина открытия ручного клапана.

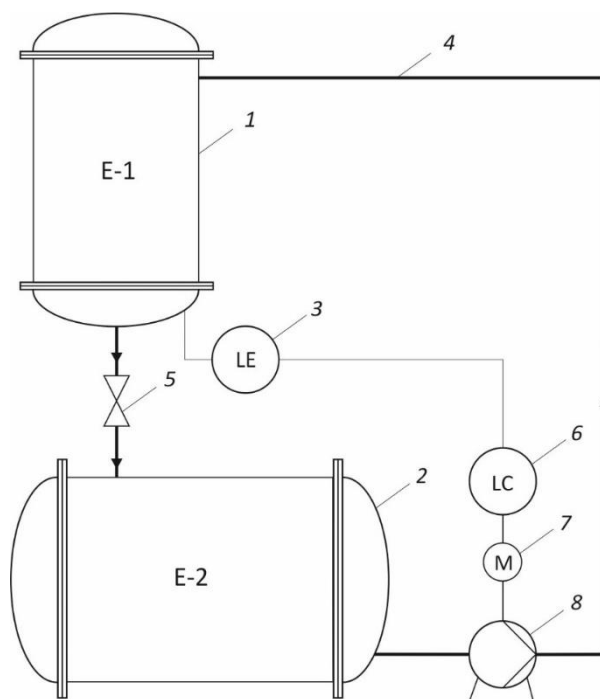


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение объекта управления

1 – основная ёмкость; 2 – вспомогательная ёмкость; 3 – датчик жидкостного уровня; 4 – линия запаздывания; 5 – кран шаровый полнопроходной; 6 – регулятор уровня; 7 – привод насоса; 8 – насос

Данный ПЧВ (преобразователь частоты векторный) обладает следующими основными характеристиками: питание 220В или 380В; выходная частота до 50Гц (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – ПЧВ

Важной частью любой автоматизированной системой управления технологическим процессом является её интеллектуальная часть, реализуемая в настоящее время обычно на базе ПЛК (программируемого логического контроллера) (рисунок 2.3).

Контроллер решает ряд типовых задач:

- измерение и преобразование входных аналоговых и дискретных сигналов;
- первичная обработка сигналов;
- вычислительные операции;
- формирование выходных аналоговых или дискретных сигналов управления.

В связи с этим к контроллеру предъявляется ряд требований, которые определяются как технологическим процессом, так и организационными особенностями компании-производителя, а именно:

- информационная мощность, т. е. возможность одновременной обработки измеряемых сигналов и формирования управляющих сигналов, вычислительные возможности процессора, объём памяти и т.д.;

- конструктивное исполнение (модульность, степень интеграции модулей, возможность быстрой замены модулей, в т. ч. горячей замены без остановки технологического процесса, ремонтпригодность и т.д.);

- наличие сервисных центров и центров поддержки потребителей оборудования.

- и т. д.

Основным правилом при выборе ПЛК должно быть соответствие цены и качества контроллера важности процесса, который он автоматизирует.

В данной системе, как и во множестве других, небольших автоматизированных системах регулирования, используется отечественный контроллер ОВЕН ПЛК 150. Схема подключения питания, дискретных и аналоговых входов и выходов ПЛК 150 представлена на рисунке 2.3.

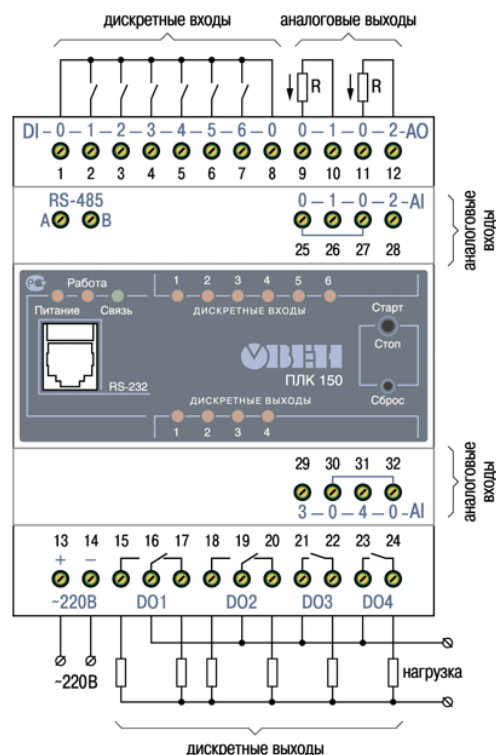


Рисунок 2.3 – Схема входов и выходов, и разъемов питания

Данный контроллер обладает следующими параметрами и характеристиками: Процессор RISC ARM9 (180МГц); RAM (random access memory) 8МБ; ROM (read only memory) 4МБ; SRAM (static random access memory) 16КБ, а также отсутствие операционной системы; скорость дискретных входов 10КГц; наличие аналоговых входов и выходов; наличие интерфейсов Ethernet (а также RS-232, RS-485, используя радио, GSM, ADSL модемы); рабочая температура от -20 до +70 °С; возможности самодиагностики; часы реального времени; встроенный аккумулятор; возможность сохранять архивы на внешний носитель; набор готовых программных модулей, предоставляемых бесплатно; расширение точек ввода\вывода.

Для создания управляющей программы используется среда Codesys (Controller Development System) — это специализированное программное обеспечение, предназначенное для промышленной автоматизации, разработанное компанией 3S-Smart Software Solutions в Германии. Программное обеспечение Codesys распространяется свободно и для того чтобы производители технических средств могли воспользоваться этой

средой, они разрабатывают специальные драйверы, обеспечивающие связь технического средства (ПЛК) с Codesys. Codesys предоставляет пользователю языки программирования стандарта МЭК 61131-3. В данный момент Codesys широко используется для большой массы контроллеров. На сегодняшний день более 300 компаний в мире выпускают на рынок контроллеров продукцию с программным обеспечением Codesys в качестве рекомендуемого штатного инструмента программирования ПЛК.

Для процесса моделирования используется программный продукт MATLAB Simulink. Данная программа - это среда моделирования сложных технических систем и основной инструмент для модельно-ориентированного проектирования. В основе работы его лежит построение графических схем и выстраиваемый набор блоков. Данная среда широко применяется в сфере автоматизации и цифровой обработке сигналов.

3 Экспериментальная часть работы

3.1 Идентификация систем управления

Идентификация объекта управления - это процесс получения математической модели объекта. Одним из широко распространённых способов идентификации объектов управления является графический способ по переходной характеристике или кривой разгона. Кривая разгона – это кривая, полученная в результате реакции объекта на входное ступенчатое воздействие. Кривая разгона или переходная характеристика $h(t)$ – это реакция объекта управления на ступенчатое входное воздействие. По этой кривой разгона определяются динамические характеристики объекта управления.

Прежде чем совершить идентификацию системы необходимо слить всю жидкость из основной в вспомогательную.

Процесс получения кривой разгона происходит следующим образом. Количество воды в емкости растет линейно, при воздействии на входе которое имеет постоянный характер. Если представить, что звено идеально интегрирующее (при бесконечном количестве воды и объеме емкости), но тут существует ряд ограничений (количество воды и объем емкости, и ограниченный возможный объем перекачки насосом). В идеальном случае объект можно представить в виде идеального интегрирующего звена при наличии бесконечно большой емкости и неограниченного количества жидкости. Чтобы определить график кривой разгона вода до минимума из основной емкости переливается в вспомогательную. Затем, производится перевод регулятора на ручной режим, где требуется зафиксировать время подачи ступенчатого воздействия, то есть изменения управляющего сигнала на частотный преобразователь, что существенно может увеличить или уменьшить производительность насоса. На рисунке 3.1 изображен график кривой разгона системы. Входное ступенчатое воздействие – ступенчатая подача воды насосом.

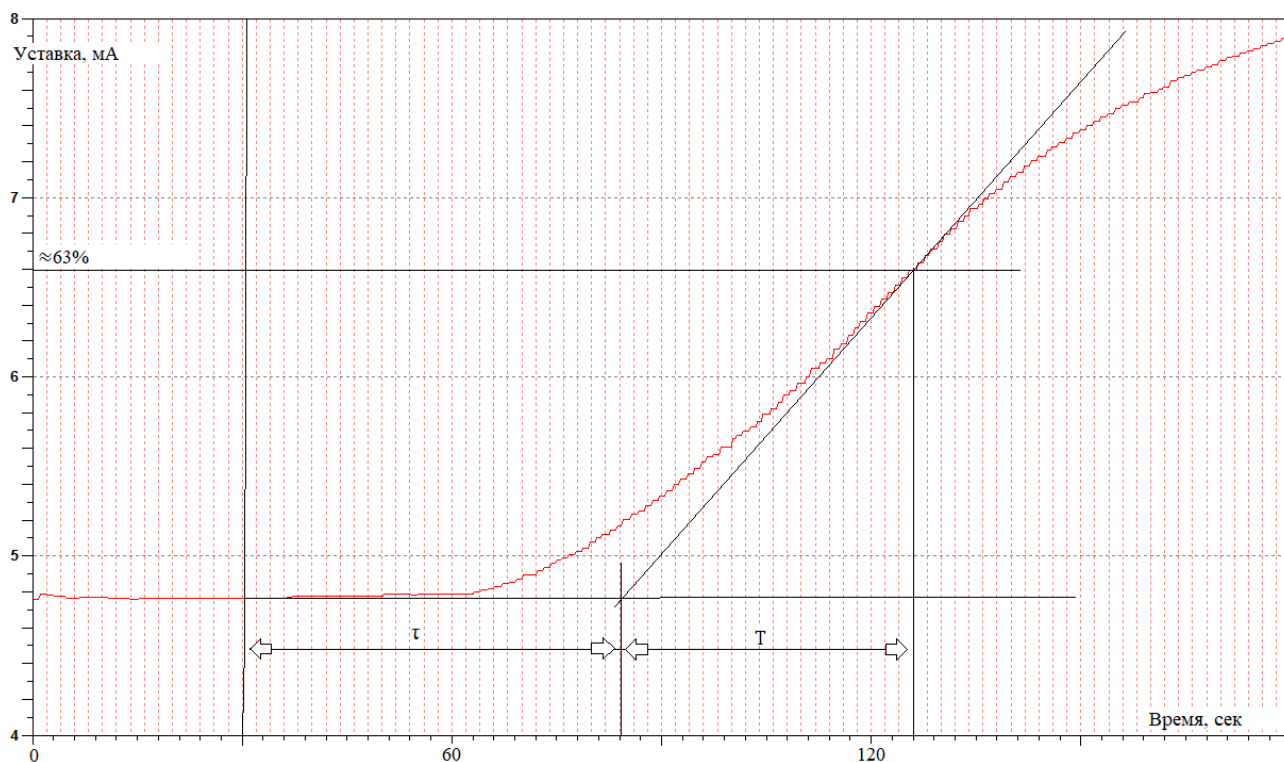


Рисунок 3.1 – Кривая разгона объекта при ступенчатом входном воздействии

Передаточная функция объекта управления принимается в виде апериодического звена с чистым запаздыванием

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1} \cdot e^{-\tau s} \quad (3.1),$$

где τ – интервал времени от момента подачи входного сигнала до момента начала изменений в системе системы (или время запаздывания); T – постоянная времени объекта; k – коэффициент передачи (отношение установившегося значения выходной величины к величине ступенчатого входного сигнала, $k=1,3$). По данной кривой определяется время запаздывания $\tau=55$ секунд и постоянная времени $T=47$ с. Таким образом, с учётом полученных значений передаточную функцию объекта управления можем записать в следующем виде:

$$W(s) = \frac{1,3}{47s+1} \cdot e^{-55s} \quad (3.2)$$

При настройке регулятора традиционными способами настройки регулятора возможны трудности, так как соотношение $\tau/T > 1$. Данное соотношение является ориентиром для инженера-проектировщика при выборе типа регулятора. Если $0,2 < \tau/T < 1$, рекомендуется использовать ПИД или ПИ

регулятор (непрерывный или цифровой), если $\tau/T < 0,2$ то цифровой или непрерывный регулятор. Если же данное соотношение больше единицы, то существует необходимость компенсировать запаздывание в контуре системы управления.

3.2 Исследование и моделирование систем с регулятором Смита и ПИД-регулятором в среде Matlab Simulink

Прежде чем провести исследования на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием, необходимо и немаловажно провести исследование моделирования данных систем, которое позволяет оценить возможное поведение реального объекта и избежать грубых ошибок, а также не столкнуться с лишними экспериментальными работами. Результаты моделирования нельзя считать абсолютно достоверными ввиду того, что они базируются на математической модели объекта, которая не учитывает всех особенностей объекта и в любом случае является неточной. Однако результаты, полученные в процессе моделирования и исследования систем, являются важными по уже перечисленным выше причинам. Немаловажными являются показатели качества переходных процессов, T_p - время регулирования и σ - перерегулирование, так как с помощью них мы можем в более полном объеме оценить переходной процесс. Время регулирования - это время переходного процесса, за которое регулируемая величина выйдет на заданное значение уставки и будет оставаться на заданном значении. Перерегулирование – это максимальное отклонение переходного процесса от значения уставки, в процессе регулирования, возможно оценить в процентах как: $\sigma = \frac{|h_{\max}(t) - h_{\text{уст}}(t)|}{h_{\text{уст}}(t)} * 100\%$, здесь $h_{\max}(t)$ – максимальное отклонение регулируемой величины и $h_{\text{уст}}(t)$ – установившееся значение регулируемой величины.

Модели систем: без запаздывания содержащая ПИД регулятор (а), с запаздыванием содержащая ПИД регулятор (б) и система с запаздыванием,

содержащая регулятор Смита (в) – представлены на рисунке 3.2 соответственно.

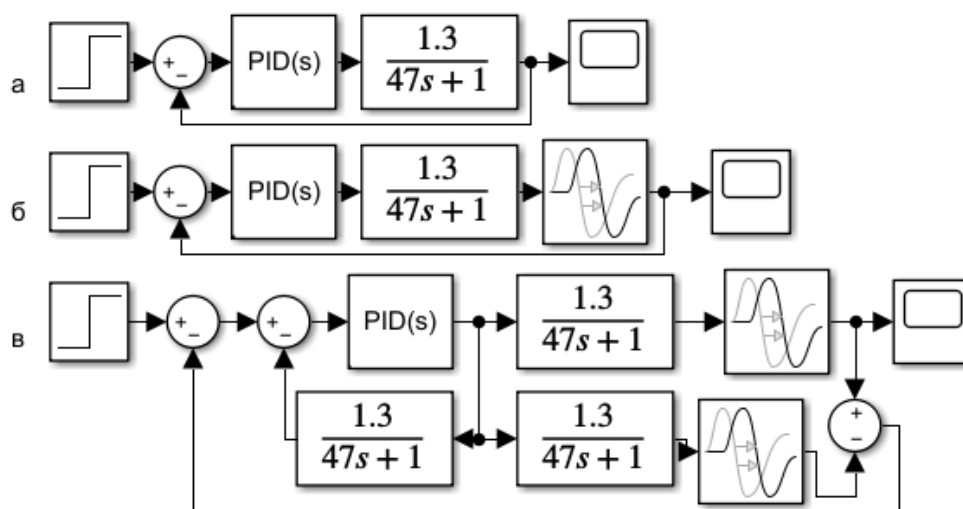


Рисунок 3.2 – Система без запаздывания содержащая ПИД регулятор (а), система с запаздыванием содержащая ПИД регулятор (б) и система с запаздыванием, содержащая регулятор Смита (в)

Для более полного понимания работы систем, настроим коэффициенты ПИД регуляторов и промоделируем работу данных моделей (рисунок 3.2 а,б,в).

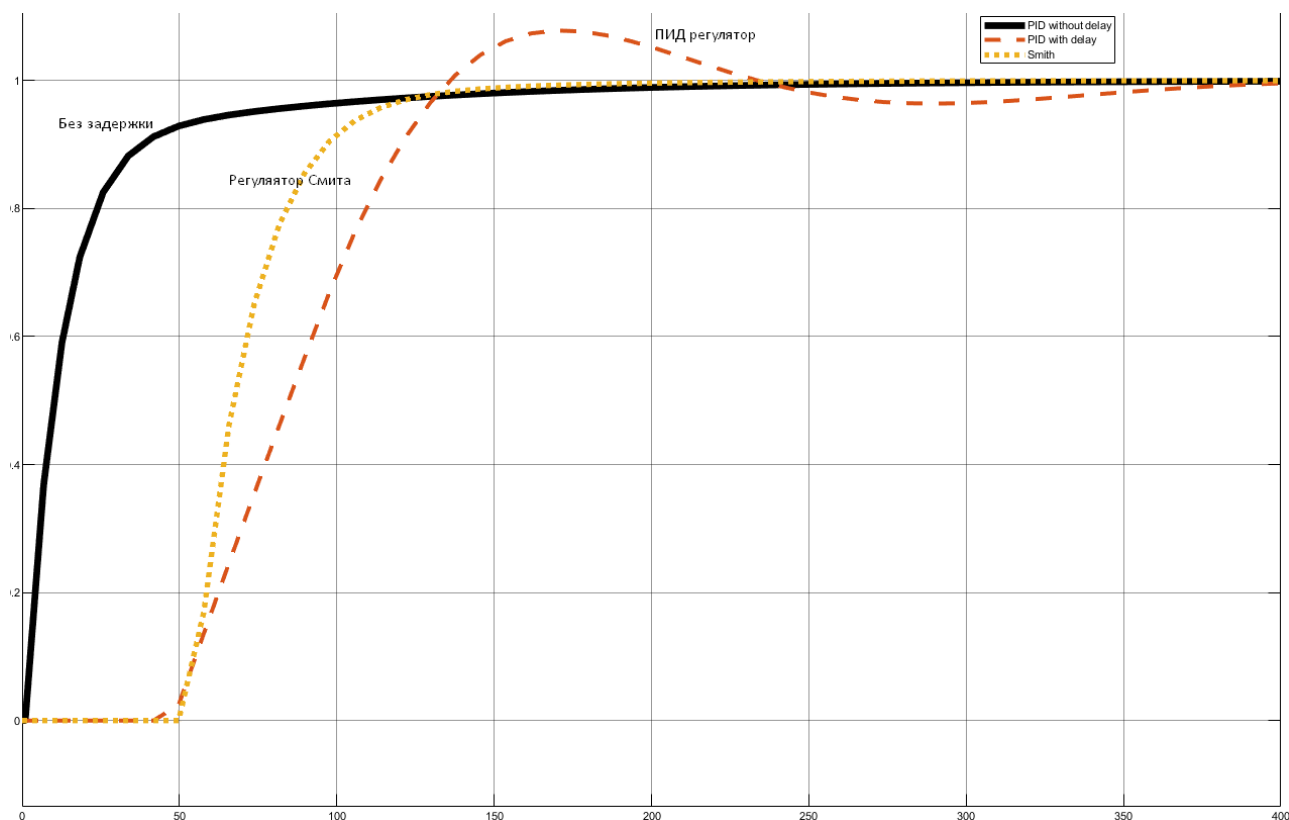


Рисунок 3.3 – Работа системы без запаздывания содержащая ПИД регулятор, работа системы с запаздыванием содержащая ПИД регулятор и работа системы с запаздыванием, содержащая регулятор Смита

Благодаря данному исследованию можно всецело утверждать о том, что регулятор Смита способен сводить к минимуму влияние запаздывания на систему, что очень хорошо видно из рисунка 3.3. В сравнении с ПИД регулятором, Смит регулятор - без перерегулирования, за минимально возможное время регулирования, выходит на заданное значение, чем и характеризует себя подходящим для систем с транспортным запаздыванием, далее результаты моделирования (рис. 3.3) сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнение работ моделей систем с запаздыванием

Тип системы	Показатели качества	
	Б, %	T _p , сек
Система без запаздывания	0	250
	10	400

Система с запаздыванием содержащая ПИД регулятор		
Система с запаздыванием, содержащая регулятор Смита	0	250

3.3 Исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием

После вышесказанного литературного обзора и первичных исследований моделей систем с звеном запаздывания, необходимо произвести аналогичные исследования на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием.

Для создания управляющих программ, необходимо перейти от уравнения передаточной функции объекта управления к разностному уравнению:

$$W(s) = \frac{1}{Ts+1} * e^{-\tau s}, \quad (3.3)$$

Или

$$Y(s) = \frac{1}{Ts+1} * e^{-\tau s} * X(s). \quad (3.4)$$

После чего перейдём к дифференциальному уравнению, заменив $s = \frac{d}{dt}$;

$$T \frac{dy}{dt} + y = x(t - \tau). \quad (3.5)$$

Перейдем к разностному уравнению:

$$T \frac{y[n+1]-y[n]}{\Delta t} + y[n] = x[n - k\Delta t]; \quad (3.6)$$

$$y[n + 1] = \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) * y[n] + \frac{\Delta t}{T} * x[n - k\Delta t], \quad (3.7)$$

где Δt - шаг дискретизации; $\tau = k * \Delta t$ - время запаздывания.

Полученное разностное выражение необходимо использовать как модель объекта управления. На рисунке 3.4 приведены обозначения сигналов, вычисление которых производится в программе контроллера.

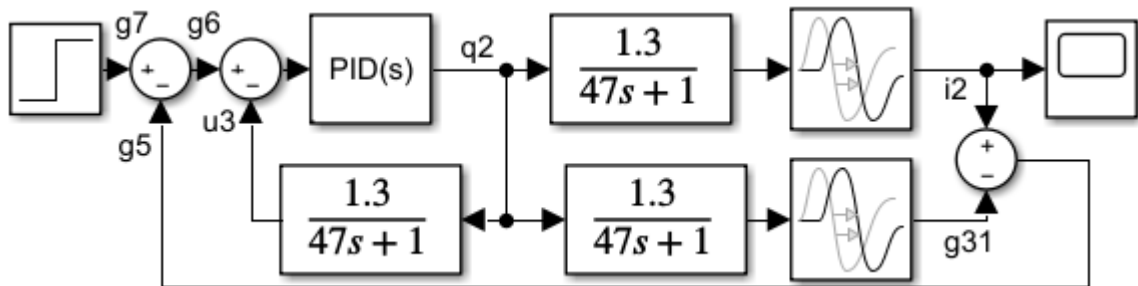


Рисунок 3.4 – Система регулирования с регулятором Смита

Ниже представлен программный код на языке ST, реализующая модель объекта.

```

FOR i:= 0 TO 58 DO;
    c[60-i] :=c[59-i];
END_FOR;
c[1] :=q2;
T:=47;
u1 :=(1-1/T)*u2+1.29*q2*(1/T) ;
u2 :=u1 ;
u3 :=4+u1*16/100 ;
g3 :=(1-1/T)*g4+1/T*c[55]*1.29 ;
g4 :=g3 ;
g31 :=4+g3*16/100 ;
g5 :=i2-g31 ;
g6 :=g7-g5 ;
q10 :=q2 ;

```

В соответствии с данной программой происходит работа стенда физического подобия, для полного понимания функционирования программы необходимо понимать следующие обозначения:

$c[1]$ – массив значений с регулятора;
 $u1$ – выход модели объекта без запаздывания;
 $u2$ – выход модели объекта без запаздывания на предыдущем шаге;
 $u3$ – масштабирование сигнала $u1$;
 $g3$ – выход модели объекта с запаздыванием;
 $g4$ – выход модели объекта с запаздыванием на предыдущем шаге;
 $g31$ – масштабирование сигнала $g3$;
 $g5$ – разность реального объекта с моделью;
 $g7$ – уставка;
 $g6$ – сигнал рассогласования между уставкой $g7$ и разностью реального объекта с моделью $g5$;
 $q10$ – управляющий сигнал двигателем;
 $q2$ – выходной сигнал регулятора в диапазоне;
 $i2$ – входной сигнал измерения уровня.

Для формирования управляющего воздействия в данной программе необходимо использовать блок ПИД регулятора (рис. 3.5), так как он создает управляющее воздействие Y на механизм исполнения в соответствии с величиной рассогласования $e(t)$, которая равна разности входного сигнала и уставки регулятора.

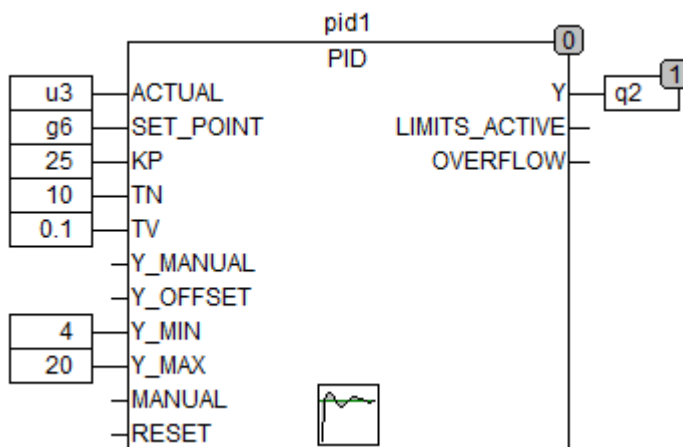


Рисунок 3.5 – Программный блок ПИД регулятора

Данное управляющее воздействие формируется в соответствии с выражением:

$$Y = Y_OFFSET + KP(e(t) + \frac{1}{TN} \int_0^{TN} e(t) + TV \frac{de(t)}{dt})$$

здесь Y_OFFSET - стационарное значение;

KP – коэффициент передачи;

TN – постоянная интегрирования;

TV – постоянная дифференцирования;

$e(t)$ – сигнал рассогласования ($SET_POINT - ACTUAL$);

$ACTUAL$ – Текущее значение переменной;

SET_POINT – Задание;

Y_MIN, Y_MAX - Значение выхода Y ограничено Y_MIN и Y_MAX .

Объявленные необходимые переменные в соответствии с входами и выходами функционального блоков. Представлено ниже.

Для того чтобы программа работала верно, необходимо для нее определить переменные и типы передаваемых данных для переменных:

```
VAR_GLOBAL c:ARRAY[1..60] OF REAL; q2:REAL; u1:REAL; g3:REAL;
g6:REAL; g7:REAL; u3:REAL; i: INT; T: REAL; u2: REAL; g4: REAL; g5:
REAL; g31:REAL; END_VAR
```

3.4 Результаты исследование моделей с регулятором Смита и ПИД регулятором на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием

Данными результатами важно отметить и подтвердить проблему регулирования системы с транспортным запаздыванием, увидеть влияние запаздывания на устойчивость и оценить качество регулирования, а также проследить исключение влияния на устойчивость регулятора Смита.

Прежде всего имеет смысл взглянуть на работу стенда с исключенным звеном транспортного запаздывания путем набора воды в основную емкость минуя звено запаздывания (рисунок 3.6 и рисунок 3.7).

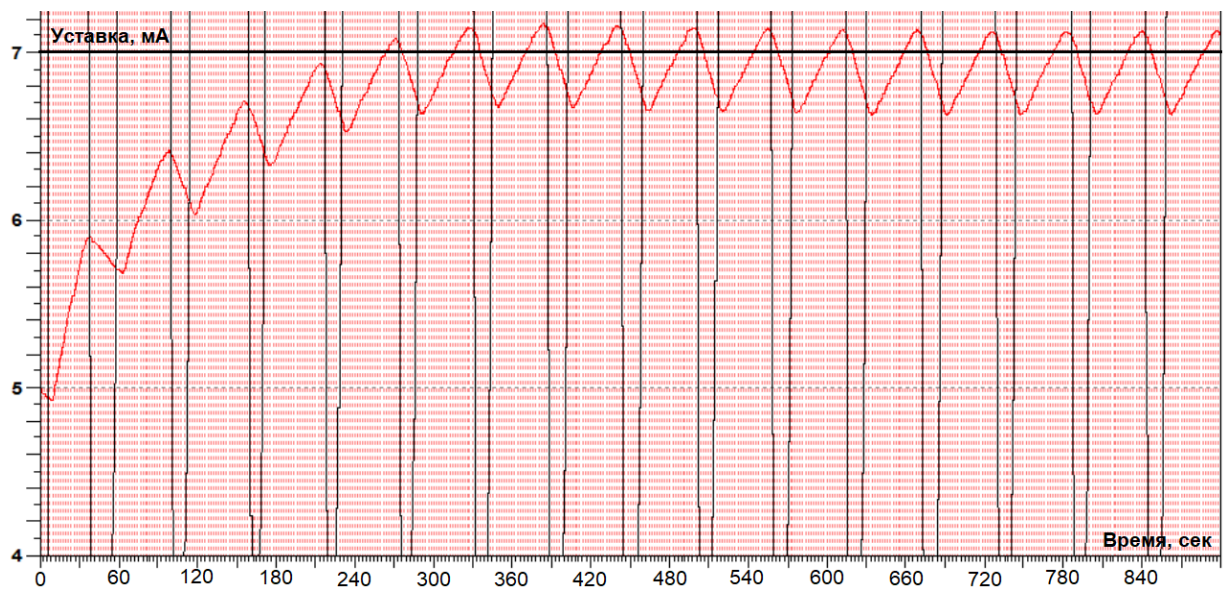


Рисунок 3.6 – Переходной процесс стэнда физического подобиия с исключенным звеном запаздывания, с коэффициентами ПИД регулятора (пропорциональный – 1,5; интегральный – 0,5; дифференциальный - 5)

Можно отметить, что на рисунке 3.6 система находится на границе устойчивости и характеризуется высокой степенью колебательности.

Далее настроим стэнд без запаздывания на процесс, который можно охарактеризовать как монотонный.

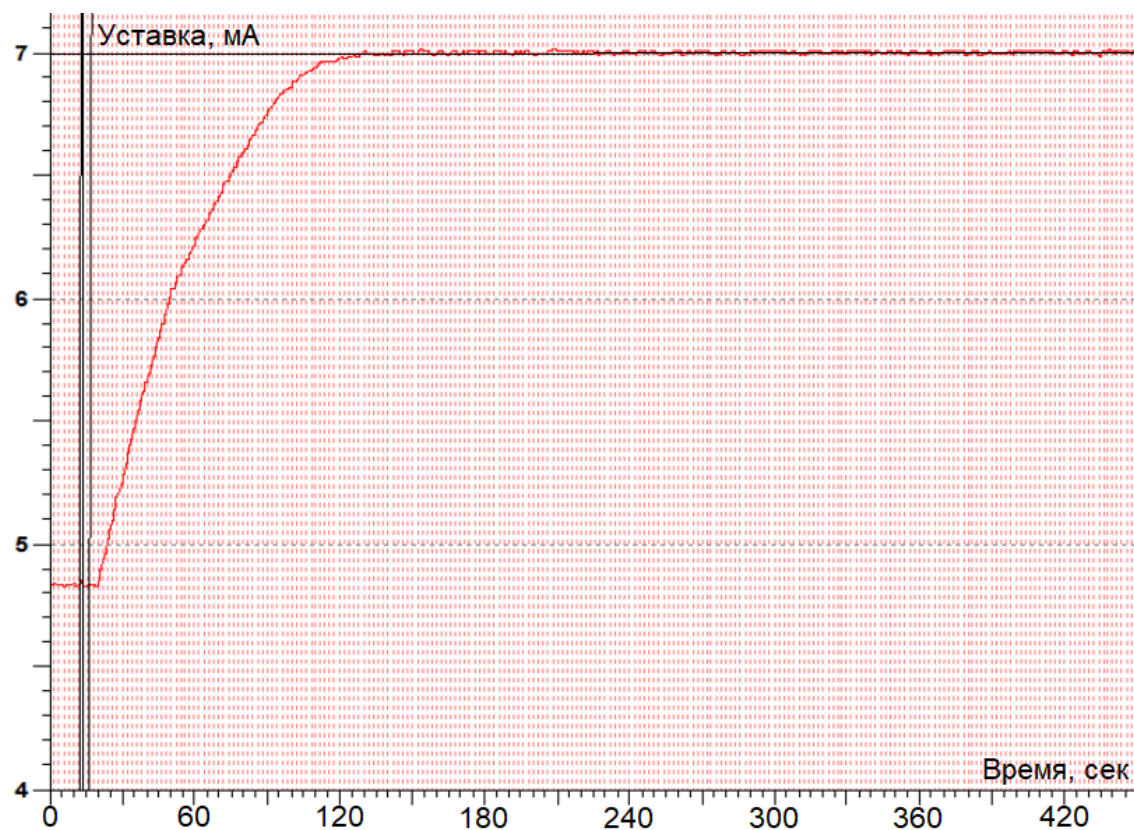


Рисунок 3.7 – Переходной процесс стенда физического подоби́я с исключенным звеном запаздывания, с коэффициентами ПИД регулятора (пропорциональный – 50; интегральный – 25; дифференциальный - 1)

На рисунке 3.7 система имеет монотонный характер и заданное значение уставки устанавливается на 130 секундах без перерегулирований.

Далее включим звено запаздывания в стенд физического подоби́я технологического процесса с запаздыванием и настроим ПИД регулятор на наилучший результат регулирования.



Рисунок 3.8 – Переходной процесс стенда физического подоби́я с звеном запаздывания, с коэффициентами ПИД регулятора (пропорциональный – 50; интегральный – 10; дифференциальный - 1)

На рисунке 3.8 отражен процесс установления величины уставки на заданном уровне, можно отметить, что система характеризуется как находящаяся на границе устойчивости, где прослеживается умеренная колебательность возле значения уставки.

Перейдем к исследованию работы стенда физического подоби́я технологического процесса с транспортным запаздыванием, где в качестве регулятора используется предиктор Смита и настроим на наилучший переходной процесс.

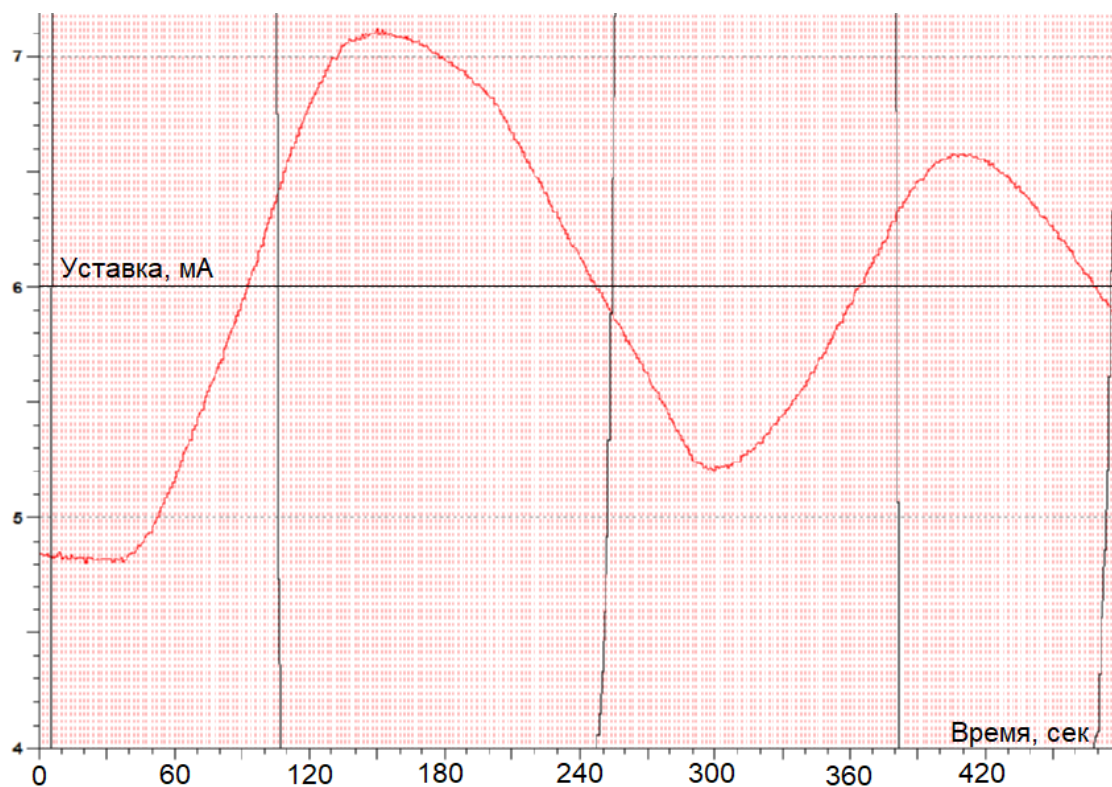


Рисунок 3.9 – Переходной процесс стенда физического подоби́я с звеном запаздывания, с регулятором Смита, настройки ПИД регулятора (пропорциональный – 2,5; интегральный – 0,5; дифференциальный – 0,1)

На рисунке 3.9 видно, что процесс установления уставки происходит на времени более чем 420 секунд с присутствием некоторой колебательности и перерегулирования, это говорит о том, что коэффициенты ПИД настроены неверно и требуется дальнейшая настройка.

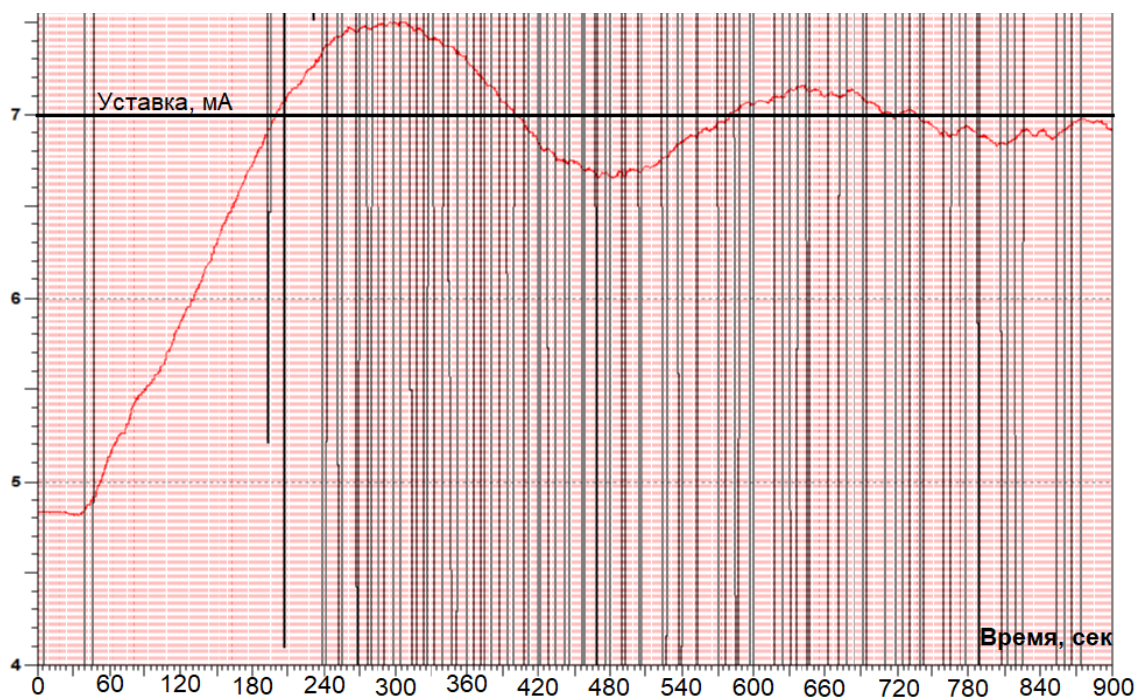


Рисунок 3.10 – Переходной процесс стенда физического подобия с звеном запаздывания, с регулятором Смита, настройки ПИД регулятора (пропорциональный – 1,03; интегральный – 0,004; дифференциальный – 1,7)

На рисунке 3.10 можно увидеть, что установление величины уставки происходит примерно в районе 900 сек, отмечается также перерегулирование около 690 секунд. Далее необходимо свести к минимуму перерегулирование.

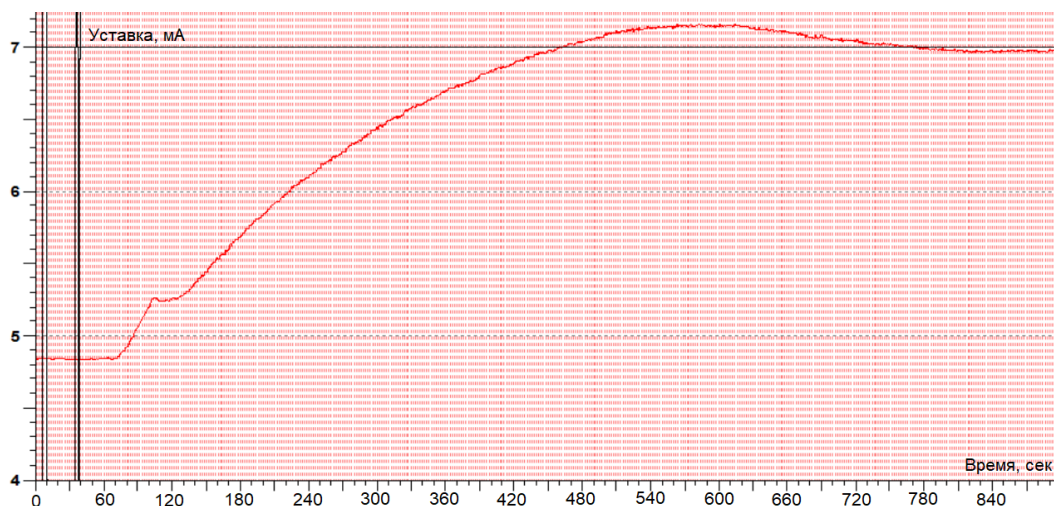


Рисунок 3.11 – Переходной процесс стенда физического подобия с звеном запаздывания, с регулятором Смита, настройки ПИД регулятора (пропорциональный – 50; интегральный – 25; дифференциальный – 1)

Наилучшими параметрами ПИД регулятора получаются: пропорциональный – 50; интегральный – 25; дифференциальный – 1. Переходной процесс (рисунок 3.11) при данных коэффициентах можно

охарактеризовать как монотонный, с очень малым временем перерегулирования для данной системы (~240 секунд) и временем выхода на уставку ~730 секунд.

Заключительным этапом обнарудуем влияние постоянной времени T на переходной процесс системы и на устойчивость, для чего изменим постоянную времени с 47 на 55.

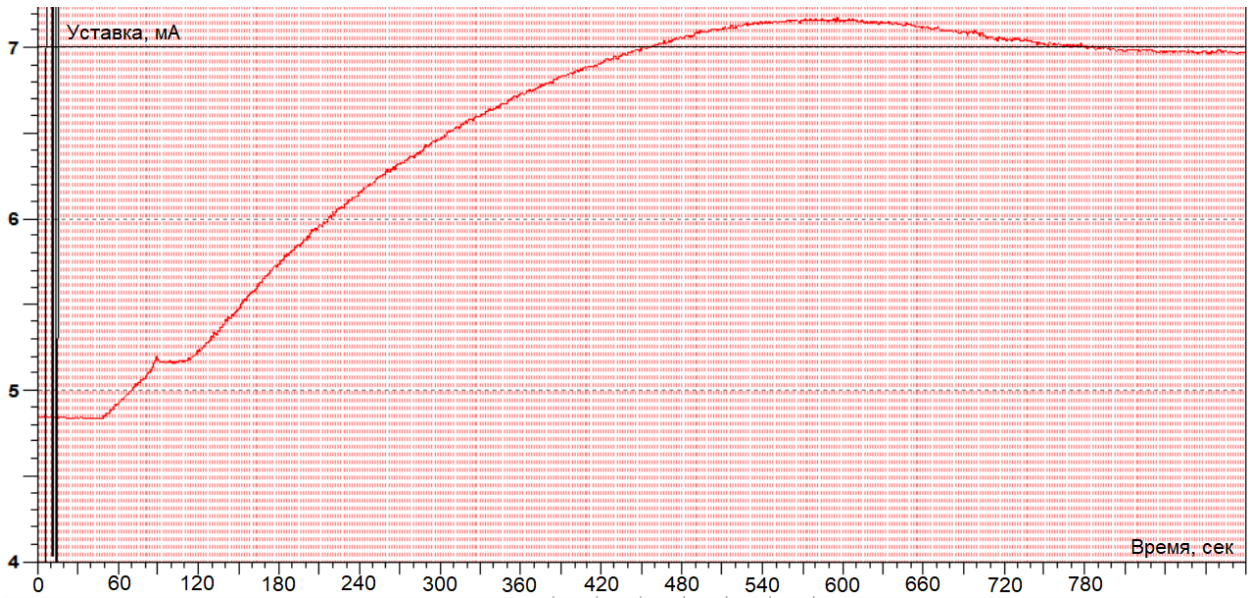


Рисунок 3.12 – Переходной процесс стэнда физического подобия с звеном запаздывания, с регулятором Смита, настройки ПИД регулятора (пропорциональный – 50; интегральный – 25; дифференциальный – 1), постоянная времени $T=55$ секунд

Данным этапом подтверждается влияние запаздывания на переходную характеристику системы, о чем говорит увеличение времени перерегулирования и времени регулирования, то есть время перерегулирования 440 секунда, а время регулирования 730 секунд. Влияние на устойчивость минимально, но если постоянную времени увеличить более можно увидеть пагубное влияние увеличения постоянной времени.

Далее, вышепредставленные результаты экспериментов сведены в таблицу 3.2 для наглядности сравнения.

Таблица 3.2 – Сравнение методов регулирования объекта с запаздыванием

Тип системы	Параметры настройки	Показатели качества	
		δ , %	T_p , сек

Система с исключенным звеном запаздывания, Рисунок 3.6	к	1,5	~15	>840 (на границе устойчивости)
	T _и	0,5		
	T _д	5		
Система с исключенным звеном запаздывания, Рисунок 3.7	к	50	0	125
	T _и	25		
	T _д	1		
Система с звеном запаздывания, с ПИДом, Рисунок 3.8	к	50	~5	>780
	T _и	10		
	T _д	1		
Система с звеном запаздывания, с регулятором Смита (T=47 секунд), Рисунок 3.9	к	2,5	~50	>420
	T _и	0,5		
	T _д	0,1		
Система с звеном запаздывания, с регулятором Смита (T=47 секунд), Рисунок 3.10	к	1,03	~30	~900
	T _и	0,004		
	T _д	1,7		
Система с звеном запаздывания, с регулятором Смита (T=47 секунд), Рисунок 3.11	к	50	~7	740
	T _и	25		
	T _д	1		
Система с звеном запаздывания, с регулятором Смита (T=55 секунд), Рисунок 3.12	к	50	~8	750
	T _и	25		
	T _д	1		

Выводы по разделам 1, 2, 3

После проведенного изучения теоретических выкладок и исходя из проведенного анализа теоретических сведений о системах с транспортным запаздыванием, можно утверждать, что звенья запаздывания влияют на устойчивость системы и на прочие параметры в целом, кроме того, усложняется настройка ПИД регуляторов.

Были проведены масштабные практические работы, связанные с математическим выводом передаточной функции системы с регулятором Смита, проведены эксперименты по моделированию систем с ПИД регулятором и регулятором Смита. Были отмечены особенности работы систем с задержкой. Отмечено влияние задержки на переходную характеристику систем. Заметны более лучшие показатели качества переходных процессов у регулятора Смита, по сравнению с обычным ПИД регулятором, так как регулятор Смита сводит к минимуму влияние запаздывания на систему.

В ходе проведенных экспериментальных работ на стенде физического подобия технологического процесса с транспортным запаздыванием, отмечается негативное влияние запаздывания на систему регулирования, а также малая способность ПИД регулятора и сложная его настройка на данном стенде. В связи с этим не удалось получить без колебательный процесс, о чем говорит рисунок 3.8.

Исходя из очевидного влияния запаздывания на регулирование и настройку системы, был взят регулятор Смита, который должен исключать влияние звена запаздывания (известно из теоретических выкладок и анализа моделирования систем). Достоинно показавший себя регулятор Смита был настроен на наилучший показатель переходного процесса, откуда можно утверждать, что переходная характеристика получается монотонно возрастающая до значения уставки с минимальным значением перерегулирования и максимально быстрым выходом на значение уставки.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Представить себе промышленное производство без средств автоматических систем тяжело. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что средства автоматизированных систем с запаздыванием актуален.

Актуальность обуславливается рядом причин. Например тем, что есть технологические процессы, обладающие запаздыванием. Запаздывание, являющееся результатом движения какого-либо продукта по длинным конвейерным линиям или трубопроводам, называется транспортным запаздыванием. Например, движение вещества с определенной скоростью в системе, без каких-либо изменений его свойств. Кроме того, запаздывание может быть и в системах регулирования, где приборы действуют не постоянно. Расчет подобных систем имеет множество особенностей и специфик. Эти системы автоматического управления объектов с запаздыванием являются динамическими. Существуют также объекты, которые обладают скрытым запаздыванием, которое слабо влияет на их быстродействие, и очень часто им пренебрегают. При производстве, исследовании, проектировании и расчете, очень часто бывают ситуации, в которых нельзя пренебрегать транспортным запаздыванием в объекте – в его динамике, если взять частный случай, то необходимо учитывать запаздывание при управлении посредством вычислительными машинами, передачи информации и масштабных вычислений для управления в реальном времени. В подавляющем большинстве случаев, запаздывание является негативным фактором в системе, в результате чего возникают трудности с устойчивостью и качеством управления, однако обратное положение дел тоже возможно, так как запаздывание может носить положительных характер в системе.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В настоящей работе исследуется влияние запаздывания на устойчивость объектов с большим транспортным запаздыванием. На сегодняшний день существует множество предприятий со всего мира, на которых есть технологические процессы с запаздыванием, что объясняет потребность на мировом рынке в более продвинутых системах управления объектами с большим транспортным запаздыванием.

Конечные потребители более совершенных систем управления технологическими процессами с запаздыванием, любые предприятия, на которых есть какая-либо конвейерная линия или продуктопроводы. Существует множество таких промышленности, как в России, так и за рубежом. Например: транспортировка нефти или газа, конвейерные линии производства автомобилей.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Данный анализ проводится с помощью оценочной таблицы сравнения конкурентных технических решений:

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентно-способность	
		ПИД регулятор	Регулятор Смита	ПИД регулятор	Регулятор Смита
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Повышение производительности	0,13	5	4	0,6	0,5

Помехоустойчивость	0,08	5	5	0,7	0,3
Энергоэкономичность	0,06	4	4	0,5	0,6
Надежность	0,13	5	4	0,8	0,6
Потребность в ресурсах памяти	0,05	3	2	0,4	0,4
Функциональная мощность	0,08	5	3	0,7	0,4
Простота эксплуатации	0,09	5	4	0,6	0,5
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность технологии	0,09	5	4	0,8	0,7
2. Уровень проникновения на рынок	0,08	6	3	0,8	0,6
3. Цена реализации	0,07	3	3	0,2	0,2
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	0,4	0,4
5. Финансирование разработки	0,06	4	4	0,2	0,2
Итого	1			6,7	5,4

Таким образом, конкурентоспособность разработки системы с ПИД-регулятором составила 6,7, в то время как у предполагаемого конкурента 5,4. Результаты показывают, что оба регулятора являются конкурентоспособными.

4.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>S1. Наличие опытного руководителя</p> <p>S2. Экологичность технологии.</p> <p>S3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>S4. Актуальность исследования</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>W1. Сложность проведения исследований.</p> <p>W2. Большой срок поставок оборудования для реализации данных технологий.</p> <p>W3. Проблемы с материально-техническим обеспечением лаборатории.</p>
<p>Возможности:</p> <p>O1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>O2. Большой потенциал применения данной разработки</p> <p>O3. Появление дополнительного спроса на новый разработку в связи с обращением с предприятий с большими транспортными запаздываниями</p> <p>O4. Использовать инфраструктуру коллег из университетов дальнего зарубежья.</p>	<p>O1O4S1S4 Возможность дальнейшего исследования в рамках аспирантуры</p> <p>O2S2 Возможность применения технологии на предприятиях негативно влияющих на экологию</p> <p>O3S3 Экономический интерес предприятий в реализации данной технологии</p>	<p>O1O4W1 Благодаря инфраструктуре ТПУ и университетов других стран исследование данной темы проходит более продуктивно</p> <p>O2O3W3W2 Потенциал и интерес предприятий с технологическими процессами с запаздываниям обуславливает возможности и важности реализаций новых технологий</p>
<p>Угрозы:</p> <p>T1. Развитая конкуренция технологий АСУТП, мехатроники и робототехники</p>	<p>T1S4 Продвижение новой технологии с целью появления спроса путем написания статей в иностранные журналы</p> <p>T3S2 Использование побочных и сопотствующих технологий</p>	<p>T1W3 Отсутствие спроса на новые технологии, могут ограничить поступление финансовых средств</p> <p>T1W3W1 Данные результаты НИР можно дополнить, что дает</p>

<p>Т2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p> <p>Т3. Введения дополнительных государственных требований к АСУТП, мехатроники и робототехники</p>		<p>большое пространство для дальнейших исследований.</p>
---	--	--

Таблица 4.3 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4
O1	+	-	-	-
O2	-	+	-	-
O3	-	-	+	-
O4	-	-	-	+

Таблица 4.4 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W3
O1	+	-	-
O2	-	+	-
O3	-	-	+
O4	+	-	-

Таблица 4.5 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4
T1	-	-	-	+
T2	-	-	-	-

T3	-	+	-	-
----	---	---	---	---

Таблица 4.6 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W3
T1	+	-	+
T2	-	-	-
T3	-	-	-

4.4 Планирование научно-исследовательской работы

4.4.1 Структура работ

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке: определение структуры работ в рамках научного исследования; определение участников каждой работы; установление продолжительности работ; построение графика проведения научных исследований. Распределение этапов и работ представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление технического задания	Руководитель
	2	Выбор направления исследований	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Составление литературного обзора	И
	4	Построение модели эксперимента	И
	5	Проведение практической части	И
Обобщение и оценка результатов	6	Анализ и обработка результатов	Руководитель, И
	7	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель, И

Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	И
	9	Подготовка к защите ВКР	И

4.4.2 Разработка графика проведения научно-технического исследования

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5} \quad (4.1),$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения работы чел.дн;

t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.дн;

t_{max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (4.2),$$

T_{pi} где – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для построения графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта длительность каждого из этапов работ в рабочих днях переводится в календарные дни по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot K_{КД} \quad (4.3),$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения работы в календарных днях;

$T_{РД}$ – продолжительность выполнения работы в рабочих днях;

$K_{КД}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$K_{КД} = \frac{T_{КД}}{T_{КД} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (4.4),$$

где $T_{КД}$ – количество календарных дней в году;

$T_{ВД}$ – количество выходных дней в году;

$T_{ПД}$ – количество праздничных дней в году.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (таблица 4.8).

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (4.5),$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (4.6),$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году. Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе необходимо округлить до целого числа.

Значение коэффициента календарности для 2021 года:

$$K_{КД} = \frac{365}{365 - 118} = \frac{365}{247} = 1,45 \quad (4.7),$$

Пример расчета длительности календарных работ:

$$t_{ожгi} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8; T_{pi} = \frac{2,8}{1} = 2,8; T_{ki} = 2,8 \cdot 1,49 = 4,2 \approx 4 \text{ дн.} \quad (4.8)$$

Таким образом, суммарная длительность работ в рабочих днях (T_{pi}) для руководителя составила 7,6 дней, для студента– 43,8 дней. Длительность работ в календарных днях (T_{ki}): для руководителя – 11 дней, для студента – 64,2 дней.

Таблица 4.8 – календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ							
				февр		март		апр		май	
				1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Руководитель	4	■							
2	Выбор направления исследований	Руководитель	5	■							
3	Составление литературного обзора	студент	37,7								
4	Построение модели эксперимента	студент	2,8								
5.	Проведение практической части	Студент	9,7								
6.	Анализ и обработка результатов	Руководитель, студент	1					■			
7.	Обсуждение и оценка эффективности и результатов	Руководитель, студент	1						■		
8.	Составление пояснительной записки	студент	3								
9.	Подготовка к защите ВКР	студент	9								

Штриховка - руководитель; Без штриховки - студент.

4.5 Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.5.1 Расчёт материальных затрат

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. Все материальные затраты, участвующие в научном исследовании представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
канцелярия	шт	1	300	300
вода	л	10	50	500
Контроллер Овен ПЛК150 220 АМ	шт	1	15600	15600
Уровнемер Овен ПДУ-И	шт	3	29900	89700
Клапан регулирующий MV54	шт	1	164000	164000
Итого				270100

4.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального программного обеспечения, необходимого для проведения работ по конкретной теме. Расчет затрат по данной статье представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Затраты на специальное оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1.	Matlab	1	8130	8130

2.	Microsoft Office	1	9353	9353
3.	Codesys	1	32000	32000
Итого:				19794,2

*Доля стоимости вышеперечисленного ПО, расходуемая во время ВКР, составляет 40%.

4.5.3 Расчет амортизационных отчислений

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Используется формула

$$C_{AM} = \frac{H_A * Ц_{ОБ} * t_{рф} * n}{F_D} \quad (4.9),$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования; $Ц_{ОБ}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.; F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году.

Рассчитаем амортизационные отчисления для ноутбука (время использования = 352 ч) и контроллера (80 часов), уровнемера (80 часов) и клапана (40 ч).

$$\begin{aligned}
 C_{AM.ноут.} &= \frac{0,4 \cdot 35000 \cdot 352 \cdot 1}{2384} = 2067,1 \\
 C_{AM.контр.} &= \frac{0,6 \cdot 15600 \cdot 80 \cdot 1}{2384} = 314 \\
 C_{AM.уровн.} &= \frac{0,6 \cdot 29900 \cdot 80 \cdot 3}{2384} = 1806 \\
 C_{AM.клап.} &= \frac{0,5 \cdot 164000 \cdot 40 \cdot 1}{2384} = 1375,8
 \end{aligned} \quad (4.10),$$

Итого амортизация = 5562,9 рублей.

4.5.4 Расчёт заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = МО/25,083$$

учитывающей, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25,083 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Таблица 4.11 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
Н Р	33 664	13 42,09	8	1,6 99	18241,7
И	15 470	61 6,75	44	1,6 99	46105,8
И того:					64347, 5

Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное

значение $K_{\text{доп.ЗП}}$ применяется при шестидневной рабочей неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае $K_n = 1,62$.

4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (4.11),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ):

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование.

При этом сумма взносов к уплате зависит от того, превысил доход установленный лимит или нет.

Ставка 30% действует по 2020 год включительно (ст. 425, 426 НК РФ). (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды, руб.
Руководитель проекта	18241,7	5472,5
Исполнитель	46105,8	13831,7
Итого		19304,2

4.5.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов (1.5.2.3 - Таблица).

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 10% от всех предыдущих статей.

$$З_{\text{накл}} = 39261,4 \text{ руб.}$$

4.5.7 Формирование бюджета научно-технического исследования

Определение бюджета затрат на исследование по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	283605
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	19794,2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	64347,5
4. Амортизационные отчисления	5562,9
5. Отчисления во внебюджетные фонды	19304,2
6. Накладные расходы	39261,4
7. Бюджет затрат НТИ	431875,2

4.5.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат двух вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

1. Исследование студентом и преподавателем (431875,2 руб).
2. Исследование компанией SCADTech (1000000руб).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{431875,2}{1000000} = 0,43;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{1000000}{1000000} = 1;$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

4.5 9 Интегральный показатель ресурсоэффективности.

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент проекта; b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.14.

Таблица 4.14– Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки 1	Бальная оценка разработки 2
Повышение производительности	0,25	5	5
Помехоустойчивость	0,15	5	5
Энергоэкономичность	0,15	4	4
Надежность	0,15	5	4
Потребность в ресурсах памяти	0,1	4	5
Функциональная мощность	0,15	5	4
Итого:	1	4,75	4,5

$$I_{p-исп1}=5\cdot0,25+5\cdot0,15+4\cdot0,15+5\cdot0,2+4\cdot0,1+5\cdot0,15=4,75;$$

$$I_{p-исп2}=5\cdot0,25+5\cdot0,15+4\cdot0,15+4\cdot0,2+5\cdot0,1+4\cdot0,15=4,5;$$

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент»

Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 431875,2 рублей.

Выявлен интегральный показатель эффективности, который говорит о том, что выгоднее проводить исследование студентом с преподавателем.

В ходе оценки двух типов систем с различными регуляторами прослеживается очевидная конкурентоспособность обоих регуляторов, конкурентоспособность разработки системы с ПИД регулятором составила 6,7, в то время как у предполагаемого конкурента 5,4.

5 Социальная ответственность

5.1 Аннотация выпускной квалификационной работы по разделу социальная ответственность

Настоящая работа заключается в исследовании влияния запаздывания на устойчивость объектов с большим транспортным запаздыванием.

Работа проходит в лаборатории десятого корпуса Томского политехнического университета, где имеются стенд с объектом управления: контроллер; основная и вспомогательная ёмкости с водой; датчик уровня жидкости; линия запаздывания; ручной вентиль; регулятор уровня жидкости; привод насоса; насос. Вся работа происходит непосредственно за компьютером, с которого осуществляется настройка контроллера и обработка информации, полученной в процессе исследования.

В настоящей работе совершенствуются алгоритмы и исследуются регуляторы для управления продуктопроводом с большим транспортным запаздыванием.

В данном разделе выпускной квалификационной работы необходимо провести анализ всех вредных и опасных факторов на рабочем месте в соответствии с действующими нормативными документами.

5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочая зона лаборатории включает в себя стенд с объектом управления: основная ёмкость; вспомогательная ёмкость; датчик уровня; линия запаздывания; ручной вентиль; регулятор уровня; привод насоса; насос. В настоящей работе совершенствуются алгоритмы и исследуются регуляторы для управления продуктопроводом с большим транспортным запаздыванием.

Рабочее место включает в себя стол, компьютер. Лаборатория автоматики находится в НИ ТПУ.

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество; рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте; рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.

В соответствии с СН-245-71 в помещении должен быть организован воздухообмен.

В соответствии с СН-181-70 рекомендуются следующие цвета окраски помещений: потолок - белый или светлый цветной; стены - сплошные, светло-голубые; пол - темно-серый, темно-красный или коричневый. Применение указанной палитры цветов обусловлено ее успокаивающим воздействием на психику человека, способствующим уменьшением зрительного утомления.

5.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

В данном разделе рассмотрим основные требования по эргономике рабочего места при выполнении работ сидя. Данные требования регламентируются ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования». В ГОСТе указаны такие параметры, как высота сидения, ширина пространства для ног, высота рабочей поверхности для человека, выполняющего работы в сидячем положении.

Рабочее место - это зона пространства, оснащена необходимым оборудованием, где происходит трудовая деятельность одного работника или группы работников.

При проектировании рабочего места необходимо исходить из конкретного анализа трудового процесса человека на данном оборудовании

и учитывать антропометрические данные, физиологические и психологические характеристики трудового процесса, санитарно-гигиенические условия работы.

Независимо от профессионального назначения есть общие требования для сидений длительного пользования:

1. Сиденье должно обеспечивать позу, способствующую уменьшению статической работы мышц.
2. Сиденье в целом и его элементы должны создавать условия для возможности изменения рабочей позы
3. Наличие ряда регулируемых параметров (высота сиденья, угол наклона спинки, высота спинки).

Расстояние от глаз пользователя до экрана монитора должно быть не менее 50 сантиметров, оптимально – 60–70 сантиметров. Расстояние от экрана монитора до задней стенки монитора соседнего ряда должно быть не менее 2 метров, а расстояние между боковыми стенками – не менее 1,2 метров.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека. К микроклиматическим показателям относятся температура, влажность и скорость движения воздуха, температура поверхностей ограждающих конструкций, предметов, оборудования, а также некоторые их производные.

В таблице 1.1 представлены оптимальные и допустимые значения температуры, влажности и скорости движения воздуха согласно ГОСТ

12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

Таблица 5.1– оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Категория работ, Вт	Параметр микроклимата	Оптимальная величина	Допустимая величина
Холодный	Iб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	21-23°C 40 – 60% 0,1м/с	15-28°C 20 – 80% Не более 0,2 м/с
Теплый	Iб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	22-24°C 40-60% 0,2 м/с	21-28°C 20 – 80% 0,1-0,5 м/с

Оптимальный уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером, не должен превышать 50 дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах – 65дБА. Максимальный допустимый уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. Фактический уровень шума в лаборатории составляет 60 дБА.

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работника, повышает безопасность труда и снижает травматизм. Согласно СНиП II-4-79, в помещениях вычислительных центров

необходимо применить систему комбинированного освещения. Согласно в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк. Для общего освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы.

5.4 Электромагнитное излучение

Основным вредным фактором для студента является электромагнитное излучение. В таблице 1.2 приведены временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей.

Таблица 5.2 – Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электрического поля		15 кВ/м

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами. Для того, чтобы снизить вредное влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1) Продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должна превышать 2 ч. Предусматриваются обязательные перерывы в

работе на ПК, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата.

2) Рабочее место с ПК должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии $60\div 70$ см, но не ближе 50 см.

3) Для ослабления влияния рассеянного рентгеновского излучения от монитора ПК рекомендуется использовать защитные экраны из металлической сетки и металлических прутков, в виде навесов и допустимая величина защитного сопротивления заземления экранирующих устройств не должна быть более 4 Ом.

5.5 Электробезопасность

В работе с установками или средствами, требующими питания от электрической сети, очень важным фактором является **электробезопасность**. В производственных процессах настоящей работы используются два рода тока – постоянный и переменный. Они оказывают различное воздействие на организм при напряжениях до 500 В. Наибольшую опасность представляет переменный ток частотой 50 Гц, которая является стандартной для отечественных электрических сетей.

Все производственные электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности); до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью); свыше 1000 В (помещения особо опасные).

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие способы и средства: защитные оболочки; защитные ограждения (временные или стационарные); защитные барьеры.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют следующие способы: защитное заземление; зануление; применение безопасного разделительного трансформатора; малое напряжение; защитное отключение.

Средства индивидуальной защиты подразделяются на изолирующие, вспомогательные и ограждающие.

5.6 Превышение уровня шума

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются компьютер, вентиляторы системы охлаждения, объект управления. Оптимальный уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером, не должен превышать 50 дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах – 65 дБА. Максимальный допустимый уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. Фактический уровень шума в лаборатории составляет 60 дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты (СИЗ).

5.7 Искусственное освещение

Рабочим местом является лаборатория с компьютерами, где проводится исследования, поэтому разрядом рассматриваемой зрительной работы будет А-2 в соответствии со СНиП 23-05-95.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в офисных помещениях для использования ПЭВМ следует проводить чистку стекол, оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

Лаборатория основ автоматики, находящаяся в НИ ТПУ в 10 корпусе (к.025) представляет собой помещение квадратной формы, шириной $A=4,5$ м; длиной $B=7$ м. В лаборатории располагаются 8 рабочих зон с лабораторными стендами (включают себя микроконтроллеры, системы автоматического управления) и персональными компьютерами (ЭВМ). В лаборатории есть только одно окно с приблизительными размерам 70×50 см, поэтому очень важно подобрать лампы с требуемыми характеристиками, для соответствия системы освещения в рабочей аудитории нормам СНиП 23-05-95.

5.8 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия исследования на окружающую среду. Необходимо последовательно рассмотреть, как исследование влияет на атмосферу, гидросферу и литосферу и предложить решения по обеспечению экологической безопасности.

Персональный компьютер и объект управления являются основными источниками потребления электроэнергии. Это влечет за собой общий рост объема потребляемой электроэнергии. Для удовлетворения потребности в электроэнергии, приходится увеличивать мощность и количество электростанций. Это приводит к нарушению экологической обстановки, так

как электростанции в своей деятельности используют различные виды топлива, водные ресурсы.

5.9 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Под чрезвычайной ситуацией понимается обстановка, сложившаяся в лаборатории в результате стихийного бедствия, техногенной аварии (катастрофы), которая может повлечь или повлекла за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде.

5.10 Техногенная безопасность

При выполнении работ исследования с помощью объекта управления и компьютера могут возникнуть следующие виды опасности: поражение электрическим током; пожароопасность; взрывоопасность, поскольку все стенды с микроконтроллерами, персональные компьютеры имеют питание от электрической сети.

Основы пожарной безопасности определены по ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010. Пожарная опасность ПЭВМ, обусловлена наличием в применяемом электрооборудовании горючих изоляционных материалов.

Источниками электроопасности могут быть неисправная электропроводка, открытые токоведущие части установки, доступные для соприкосновения, отсутствие заземления. В случаях возникновения аварий работающий должен немедленно сообщить о случившемся администрации цеха и принять экстренные меры по устранению аварийной ситуации.

При загорании электрооборудования следует отключить электропитание на силовом щите; сообщить администрации и в пожарную охрану; приступить к тушению загорания имеющимися первичными средствами пожаротушения в соответствии с инструкцией по пожарной безопасности. При угрозе жизни – покинуть помещение.

При несчастном случае оказать пострадавшему первую (доврачебную) помощь; сообщить о случившемся администрации, при необходимости вызвать «скорую помощь»; принять меры к сохранению обстановки, где произошел несчастный случай, до начала расследования, если это не создает опасности окружающим.

Также наиболее часто встречаются ситуации поражение электрического тока.

5.11 Безопасность при природных чрезвычайных ситуациях

ЧС природного характера возникают при естественных природных явлениях, происходящих в окружающей среде, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Поскольку работы в лаборатории предполагает работу с высоким напряжением основными, наиболее распространенными чрезвычайными ситуациями являются остановки экспериментальных работ вследствие морозов; а также диверсии.

5.12 Анализ объекта исследования

Контроллеры и система автоматизированного управления, как и любая технологическая система, проходит следующие этапы: разработка, эксплуатация, утилизация. Как было выше отмечено, в процессе эксплуатации не происходит значительного воздействия на окружающую среду в отличие от последнего этапа. Необходимо утилизировать компоненты автоматики правильно, чтобы избежать загрязнений.

Утилизация электронного оборудования нужна, чтобы уберечь окружающую среду от загрязнений. Только таким образом можно избавиться от постоянно растущих свалок техники. А она может содержать такие

материалы, как металлические детали и пластик, которые трудно поддаются процессу разложения. Некоторые элементы техники, в частности дополнительные системы питания, содержат опасные химические соединения.

5.13 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В процессе эксплуатации учебного стенда с объектом управления могут возникать аварии, которые приведут к воспламенению. Это может нанести вред как зданию, где находится оборудование и имущество, так и персоналу, который будет находиться в этом здании. Поэтому данный фактор можно отнести и к техносocиальным, и к социотехногенным ЧС.

5.14 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций нужно заблаговременно проводить мероприятия по их предупреждению. Эти мероприятия ведут к снижению возможности для возникновения ЧС и их масштабов.

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В данном разделе были определены вредные и опасные факторы, формируемые при работе в исследовательской лаборатории, среди которых можно выделить повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, повышенный уровень шума насосов, пожаровзрывоопасность. Описаны методики снижения воздействия вредных факторов, а также регламент действий при возникновении чрезвычайных ситуаций, к которым могут привести опасные факторы.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведён анализ существующих алгоритмов управления реальными объектами с большим запаздыванием.

Для управления объектом было предложено использование классического ПИД-регулятора и специального регулятора для объектов с запаздыванием - предиктора Смита.

Для настройки коэффициентов регулятора произведена идентификация объекта управления по кривой разгона. Передаточная функция объекта управления получена в виде аperiодического звена первого порядка с чистым запаздыванием. Эта же модель использовалась для предиктора Смита.

Для сокращения количества экспериментов на реальном объекте было проведено моделирование замкнутых систем с ПИД-регулятором и предиктором Смита. В результате моделирования предиктор Смита показал лучшие качественные показатели, чем ПИД-регулятор.

Эксперименты на реальном объекте подтвердили результаты моделирования, но уже не так очевидно.

Оба способа могут быть использованы для управления подобными объектами и имеют резервы для повышения качества. Для настройки ПИД-регулятора может быть применён новый метод.

Предиктор Смита для управления объектом с запаздыванием может повысить качество с совершенствованием математической модели объекта управления. Работы в этом направлении будут продолжены.

Список литературы

1. Красовский Н.Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматгиз, 1959. – 211 с.;
2. Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. М.: Наука, 1978. – 416 с.;
3. Жабко А. П., Харитонов В. Л. Методы линейной алгебры в задачах управления. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1993;
4. Kharitonov V.L. Time-Delay Systems. Lyapunov Functionals and Martices. Birkhäuser. – 2013. – 312 p.;
5. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.engineer-oht.ru/avtomatizaciya-tp/mehanicheskoe>;
6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т1: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / под ред Н.Д. Егупова. - М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2000. – 736 с.;
7. Ордынцев В. М. Математическое описание объектов автоматизации. – М: Машиностроение. – 1965. – 360 с.;
8. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. М. Эйкхоффа. М. Мир, 1983. – 400 с.;
9. Юсупов П. М. Элементы теории идентификации технических объектов. – М.: Изд-во МО СССР, 1974. – 202 с.;
10. Дейч А.М Методы идентификации динамических объектов.- М.: Энергия, 1979.;
11. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. - М.: Высшая школа, 1991. – 343 с.;
12. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд-во «Наука», 1966. – 768 с.;

13. Михайлов В.С. Теория управления. – К.: высш. шк. Головное изд-во, 1988. – 312 с.;
14. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. И доп. – К.: высш. шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.;
15. J.G. Ziegler, N.B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the ASME. – 1942;
16. O.J.M. Smith. Close Control of Loops with Dead Time // Chem. Eng. Prog. – 1957. – V.53 – P. 217-235;
17. Ордынцев В.М. Математическое описание объектов автоматизации. – М: Машиностроение, 1965. – 360 с.;
18. Современные методы идентификации систем/Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.;
19. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 686 с.;
20. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.;
21. A. Soukkou, M.C. Belhour, S. Leulmi. Review, Design, Optimization and Stability Analysis of Fractional-Order PID Controller // Int. J. Intel. Syst. Techn. Appl. – 2016. – №8(7). – P. 73-96;
22. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. - ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.;
23. В.В. Денисенко. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. – СТА. – 2007. - №4 - с. 86 – 97;
24. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраиваемые общепромышленные регуляторы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – с. 30-33.;
25. M. Kushawah, A. Patra. Tuning PID Controller for Speed Control of DC Motor Using Soft Computing Techniques-A Review. – 2014. – №4(2) – P. 141 – 148;

26. Kiam Heong Ang, Gregory Chong, Yun Li. PID Control System Analysis, Design, and Technology // IEEE Transactions on control systems technology. – 2005. – №13(4). – P.559 – 576;
27. S. Bennett. The past of PID controllers // Annual Reviews in Control. – 2001. – №25. – P. 43–53;
28. V. J. VanDoren. PID: Still the One // Control Engineering. – 2003. – P. 28-29;
29. S. Bennett. The past of PID controllers // Proceedings of IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control. – 2000. – P.1-11;
30. V. Kumar, B.C. Nakra Nakra, A. Mittal. A Review on Classical and Fuzzy PID Controllers // International Journal of Intelligent Control and Systems;
31. I. Kaya, N. Tan and D. P. Atherton. A refinement procedure for PID controller, Electrical Engineering // Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik). – 2006. – №88(3). – P.215-221;
32. K.J. Åström, and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning // 2nd edition, ISA, 1995.;
33. J.G. Ziegler, N.B. Nichols. Process lags in automatic control circuits // Transaction of the American Society of Mechanical Engineers (ASME). – 1943. – №65. – P.433-444;
34. Sh. Bhagwan, A. Kumar, J.S. Soni. A Review on: PID Controller // International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering;
35. В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – №2(16). – С.47 – 61;
36. H. Om Bansal, R. Sharma, P. R. Shreeraman. PID Controller Tuning Techniques: A Review // J. Contr. Eng. Techn. (JCET). – 2012. – №2(4). – P. 168-176;
37. C. S. Soh, C. Bi and K. C. Chua. Direct PID Tuning For Spindle Motor Systems // Asia-Pacific Magnetic Recording Conference. – 2006. – P.1-2;

38. A. S. Jondhale, V. J. Gaikwad, S. R. Jondhale. Level Control of Tank System using PID Controller-A Review // International Journal for Scientific Research & Development. – 2015. – №3(10). – P.636-638;
39. Farhad Aslam, Mohd. Zeeshan Haider. An Implementation and Comparative Analysis of PID Controller and their Auto Tuning Method for Three Tank Liquid Level Control // Int. J. Comput. Appl. – 2011. – №21(8). – P.42-45;
40. G. H. Cohen, and G. A. Coon. Theoretical considerations of retarded control // Transactions of ASME. – 1953. – №75. – P. 827- 834;
41. Цавнин А. В. Исследование способов настройки ПИД-регулятора для объектов с транспортным запаздыванием на примере системы автоматического регулирования уровня / А. В. Цавнин, В. В. Курганов // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г. : в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — С. 205-206;
42. K. K. Tan, T. H. Lee, R. Ferdous. New Approach for Design and Automatic Tuning of the Smith Predictor Controller // Ind. Eng. Chem. Res. – 1999. – №38. – P.3438-3445;
43. T. H. Lee, Q. G. Wang. Robust Smith-Predictor Controller for Uncertain Delay